

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**INFLUÊNCIA DO USO DAS CINZAS DE CARVÃO**  
**MINERAL DE TERMELÉTRICAS EM ARGAMASSAS DE**  
**REVESTIMENTO: DOSAGEM POR CURVAS**  
**GRANULOMÉTRICAS**

Dissertação de Mestrado  
apresentada ao Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia  
Civil da Universidade Federal  
de Santa Catarina como parte  
dos requisitos necessários para  
obtenção do título de Mestre  
em Engenharia Civil

*Patrícia Vilela Margon*

**Florianópolis, Maio de 2002**

# **INFLUÊNCIA DO USO DAS CINZAS DE CARVÃO MINERAL DE TERMELÉTRICAS EM ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO: DOSAGEM POR CURVAS GRANULOMÉTRICAS**

Esta dissertação foi julgada para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA, Especialidade ENGENHARIA CIVIL, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

---

Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Janaíde Cavalcante Rocha – UFSC  
(Orientadora)

---

Prof. Dr. Jucilei Cordini – UFSC  
(Coordenador do PPGEC)

Comissão Examinadora:

---

Prof. Dr. Antônio Alberto Nepomuceno – UnB

---

Prof. Dr. Luiz Roberto Prudêncio Jr. – UFSC

---

Prof. Dr. Malik Cheriaf – UFSC

Este trabalho é inteiramente dedicado ao meu esposo Rafael Basílio, pelo apoio incondicional e companheirismo, por dividir comigo essa jornada de aprendizado e por me dar conforto nos momentos mais difíceis. Com você meu mundo fica completo...

**“Ao viver você é o mundo,**

**ao criar o mundo é seu ...”**

**(Arte Acidental)**

## ***Agradecimentos***

---

O aprendizado adquirido durante a realização deste trabalho foi muito além de um conhecimento técnico, pois a convivência com várias pessoas que demonstraram carinho, amizade, estímulo e apoio durante essa jornada me fizeram acreditar que qualquer luta profissional, quando travada com fé em Deus, é capaz de engrandecer o lado humano das pessoas. Aproveito esse espaço para agradecer a todos aqueles que, de alguma forma, tiveram participação nesta conquista, em especial:

Aos meus pais Júlio e Zilda pelo apoio e colaboração sempre surpreendentes. Foi e será sempre muito confortante poder contar com pessoas tão especiais e dignas de admiração.

Ao casal Beto e Celinha Basílio, que apesar da distância física sempre estiveram muito próximos e prontos para ajudar.

À professora Janaíde Cavalcante Rocha, por orientar, acreditar e apoiar integralmente a realização deste trabalho.

Ao professor Malik Cheriaf pelos valorosos ensinamentos.

Aos professores João Cardoso Lima e Tarcísio Antônio Grandi do departamento de Física, pela prestatividade.

Ao professor Luiz Roberto Prudêncio Jr. pela gentileza e amizade.

Ao professor Fernando Avancini Tristão pelo interesse e didática.

Ao estudante de graduação do curso de Engenharia Civil Girso Baudi Jr. pela grande ajuda nos ensaios de laboratório.

À todos os colegas do grupo ValoRes: Caroline Angulski, Flora Santos, João Paulo Silveira, Elon Lenzi, Leonardo de Brito, Anderson Kreuz, Niubis Luperon e Márcia Sardá pelo apoio, companheirismo e bom humor.

Às pesquisadoras Luciana Lopes Xavier e Vaneide Gomes pela amizade e intercâmbio.

Aos laboratoristas Luis Henrique, Renato, Fernando e Roque do Laboratório de Materiais de Construção Civil.

À GERASUL e ao CNPq pelo suporte financeiro.

Aos colegas de laboratório Jenner, Andréa, Luca, Leco e Ju Casali por tornarem os trabalhos pesados mais divertidos.

Aos colegas do curso de pós-graduação pela rica convivência.

Ao Horácio e Raul pela pureza e fidelidade de seus sentimentos.

Às amigas Suzy e Cibeles pelo apoio e carinho.

Aos meus irmãos Fernando e Alexandra, e à minha sobrinha Júlia pelo estímulo e afeto.

Aos amigos de Goiânia que me fazem crer nas relações de amizade, pois mesmo de longe sempre estiveram presentes.

Swásthya!!!

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>x</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>xiv</b>
<b>LISTA DE ABREVIACÕES.....</b>	<b>xvii</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>xix</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>xx</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>2</b>
<b>2 AS CINZAS DA QUEIMA DE CARVÃO PULVERIZADO .....</b>	<b>6</b>
2.1 PROCESSO DE OBTENÇÃO DAS CINZAS .....	6
2.2 CARACTERÍSTICAS DAS CINZAS.....	9
2.2.1 <i>Composição química e classificação das cinzas</i> .....	10
2.2.2 <i>Reação pozolânica das cinzas</i> .....	10
2.2.3 <i>Características físicas das cinzas</i> .....	11
2.3 AS CINZAS DE CARVÃO UTILIZADAS EM ARGAMASSAS.....	16
<b>3 INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA DOS AGREGADOS NO DESEMPENHO DAS ARGAMASSAS.....</b>	<b>19</b>
3.1 VISÃO PANORÂMICA SOBRE ARGAMASSAS.....	20
3.2 INFLUÊNCIA DA COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS AGREGADOS NAS PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS.....	22
<b>4 JUSTIFICATIVAS E RELEVÂNCIA DO TEMA.....</b>	<b>28</b>

4.1 JUSTIFICATIVAS DO ESTUDO .....	28
4.2 HIPÓTESES.....	29
4.2.1 <i>Hipótese geral</i> .....	29
4.2.2 <i>Hipóteses subjacentes</i> .....	29
4.2.3 <i>Hipóteses de trabalho</i> .....	29
4.3 OBJETIVOS .....	30
4.3.1 <i>Objetivo geral</i> .....	30
4.3.2 <i>Objetivos específicos</i> .....	30
4.4 RESULTADOS ESPERADOS.....	30
4.5 DELIMITAÇÕES DA PESQUISA .....	31
<b>5 MATERIAIS UTILIZADOS .....</b>	<b>32</b>
5.1 CIMENTO.....	32
5.2 CAL .....	33
5.3 AGREGADOS.....	33
5.3.1 <i>Areia</i> .....	34
5.3.2 <i>Cinzas pesadas</i> .....	36
5.4 ÁGUA.....	41
<b>6 METODOLOGIA.....</b>	<b>44</b>
6.1 METODOLOGIA DE COMPOSIÇÃO DA CURVA GRANULOMÉTRICA.....	44
6.2 PROCEDIMENTO PARA GERAR A CURVA GRANULOMÉTRICA.....	45
6.2.1 <i>Determinação do número de termos <math>m</math></i> .....	45
6.2.2 <i>Determinação da razão <math>Pr</math> entre as quantidades retidas em cada peneira</i> .....	46



6.3 CURVA GRANULOMÉTRICA TEÓRICA.....	49
6.4 DETERMINAÇÃO DAS COMPOSIÇÕES DAS ARGAMASSAS .....	51
6.4.1 <i>Traço em volume</i> .....	51
6.4.2 <i>Incorporação das cinzas pesadas</i> .....	52
6.4.3 <i>Traços em massa</i> .....	53
6.5 ANÁLISE DA GRANULOMETRIA DAS ARGAMASSAS.....	56
6.6 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DAS CINZAS .....	58
<b>7 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>60</b>
7.1 COMPOSIÇÃO DOS AGREGADOS.....	60
7.2 PREPARAÇÃO DAS ARGAMASSAS.....	61
<b>8 PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO.....</b>	<b>66</b>
8.1 TRABALHABILIDADE.....	66
8.1.1 <i>Perda de trabalhabilidade</i> .....	70
8.2 CONSUMO DOS MATERIAIS E DE VOLUME DE PASTA.....	72
8.3 CAPACIDADE DE RETENÇÃO DA CONSISTÊNCIA.....	76
8.4 MASSA ESPECÍFICA .....	80
8.5 EXSUDAÇÃO.....	82
8.6 INÍCIO E FIM DE PEGA .....	86
<b>9 PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO .....</b>	<b>89</b>
9.1 GENERALIDADES .....	89
9.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	90
9.3 MASSA ESPECÍFICA .....	93

9.4 ÍNDICE DE VAZIOS.....	95
9.5 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO.....	99
9.6 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE.....	101
9.7 ADERÊNCIA À TRAÇÃO .....	105
<b>10 CONCLUSÕES.....</b>	<b>110</b>
<b>11 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>113</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>115</b>
<b>ANEXO 1 .....</b>	<b>121</b>

## ***Lista de figuras***

---

FIGURA 2.1 – FLUXO DA CINZA DO CARVÃO MINERAL NO COMPLEXO TERMELÉTRICO JORGE LACERDA (POZZOBON, 1999). .....	8
FIGURA 5.1 – CURVA GRANULOMÉTRICA DAS AREIAS GROSSA E FINA. ....	35
FIGURA 5.2 – RETIRADA DAS CINZAS PESADAS NA BACIA – COMPLEXO JORGE LACERDA.....	37
FIGURA 5.3 – RETIRADA DAS CINZAS PESADAS NA BACIA – USINA TERMELÉTRICA CHARQUEADAS. .....	37
FIGURA 5.4 – ARMAZENAGEM DAS CINZAS PESADAS EM RECIPIENTES PLÁSTICOS.....	38
FIGURA 5.5 – CURVA GRANULOMÉTRICA DAS CINZAS CHARQUEADAS E JORGE LACERDA. ....	40
FIGURA 5.6 – MICROGRAFIA MEV DAS FRAÇÕES DE CINZAS (AMPLIAÇÃO DE 50 VEZES).....	42
FIGURA 5.7 – MICROGRAFIA MEV DAS FRAÇÕES DE CINZAS (AMPLIAÇÃO DE 200 VEZES).....	43
FIGURA 6.1 – RELAÇÃO ENTRE A PROPORÇÃO DE DIÂMETROS E O NÚMERO DE COMPONENTES .....	48
FIGURA 6.2 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA CURVA GRANULOMÉTRICA TEÓRICA. ....	50
FIGURA 6.3 – CURVAS GRANULOMÉTRICAS DAS ARGAMASSAS. ....	56
FIGURA 6.4 – CURVAS GRANULOMÉTRICAS DAS CINZAS PASSANTES NA PENEIRA 600 $\mu$ m.....	58
FIGURA 7.1 – RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS AGREGADOS COMPOSTOS.....	61
FIGURA 8.1 – MESA DE QUEDA LIVRE DA ABNT ( <i>FLOW TABLE</i> ). ....	66
FIGURA 8.2 – VARIAÇÃO DO ÍNDICE DE VAZIOS DOS AGREGADOS COM OS COEFICIENTES DE UNIFORMIDADE DAS ARGAMASSAS. ....	68
FIGURA 8.3 – DEMANDA DE ÁGUA DAS ARGAMASSAS EM RELAÇÃO AO ÍNDICE DE VAZIOS DOS AGREGADOS. ....	69

FIGURA 8.4 – GRANULOMETRIA DOS MATERIAIS UTILIZADOS NOS AGREGADOS COMPOSTOS.....	70
FIGURA 8.5 – EVOLUÇÃO DA PERDA DE TRABALHABILIDADE. ....	72
FIGURA 8.6 – RELAÇÃO ENTRE O VOLUME DE PASTA CONSUMIDO E O ÍNDICE DE VAZIOS DOS AGREGADOS.....	74
FIGURA 8.7 – VARIAÇÃO DO VOLUME DE PASTA CONSUMIDO COM A MASSA UNITÁRIA DOS AGREGADOS.....	75
FIGURA 8.8 – EQUIPAMENTO PARA ENSAIO DE RETENÇÃO DE ÁGUA (NBR 9287/1986). ....	77
FIGURA 8.9 – VARIAÇÃO DO DIÂMETRO DE ESPALHAMENTO DA ARGAMASSA JL 100% APÓS O ENSAIO DE RETENÇÃO DE CONSISTÊNCIA.....	78
FIGURA 8.10 – VALORES DO ÍNDICE DE RETENÇÃO DE CONSISTÊNCIA DAS ARGAMASSAS. ....	79
FIGURA 8.11 – CORRELAÇÃO ENTRE O ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA E A RELAÇÃO CINZA PESADA / AGLOMERANTE.....	79
FIGURA 8.12 – MASSAS ESPECÍFICAS DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO. ....	81
FIGURA 8.13 – CORRELAÇÃO ENTRE A MASSA ESPECÍFICA NO ESTADO FRESCO E A MASSA UNITÁRIA DOS AGREGADOS.....	81
FIGURA 8.14 – CORRELAÇÃO ENTRE A MASSA ESPECÍFICA NO ESTADO FRESCO E O VOLUME DE PASTA CONSUMIDO PELAS ARGAMASSAS.....	82
FIGURA 8.15 – ENSAIO DE ESXUDAÇÃO.....	83
FIGURA 8.16 – VARIAÇÃO DO VOLUME DE ÁGUA EXSUDADA COM O TEMPO.....	84
FIGURA 8.17 – VARIAÇÃO DA ÁGUA EXSUDADA COM O CONSUMO DE ÁGUA DAS ARGAMASSAS....	85
FIGURA 8.18 – RELAÇÃO ENTRE A EXSUDAÇÃO E A PERDA DE TRABALHABILIDADE.....	85
FIGURA 8.19 – APARELHO DE VICAT COM SOBREPESO PARA ARGAMASSAS. ....	86
FIGURA 8.20 – VARIAÇÃO DA ALTURA DE PENETRAÇÃO DA AGULHA COM O TEMPO. ....	87
FIGURA 9.1 – VALORES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO NAS IDADES INDICADAS. ....	90

FIGURA 9.2 – VALORES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM RELAÇÃO AO FATOR ÁGUA/CIMENTO. .....	91
FIGURA 9.3 – VALORES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM RELAÇÃO AO FATOR CIMENTO / CINZA PESADA.....	92
FIGURA 9.4 – VALORES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM RELAÇÃO AO FATOR ÁGUA/CIMENTO. .....	92
FIGURA 9.5 – VALORES DAS MASSAS ESPECÍFICAS NO ESTADO ENDURECIDO.....	94
FIGURA 9.6 – CORRELAÇÃO ENTRE OS VALORES DA MASSA ESPECÍFICA REAL (ESTADO ENDURECIDO) E OS VALORES DA MASSA ESPECÍFICA DOS AGREGADOS.....	95
FIGURA 9.7 – ÍNDICES DE VAZIOS DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO.....	96
FIGURA 9.8 – CORRELAÇÃO ENTRE O ÍNDICE DE VAZIOS NO ESTADO ENDURECIDO E O ÍNDICE DE VAZIOS DOS AGREGADOS.....	96
FIGURA 9.9 – CORRELAÇÃO ENTRE O ÍNDICE DE VAZIOS NO ESTADO ENDURECIDO E A RELAÇÃO ÁGUA / MATERIAIS SECOS.....	97
FIGURA 9.10 – CORRELAÇÃO ENTRE O ÍNDICE DE VAZIOS NO ESTADO ENDURECIDO E A RELAÇÃO ÁGUA / AGLOMERANTE EM MASSA.....	97
FIGURA 9.11– CORRELAÇÃO ENTRE O ÍNDICE DE VAZIOS NO ESTADO ENDURECIDO E A RETENÇÃO DE ÁGUA NO ESTADO FRESCO.....	98
FIGURA 9.12 – CORRELAÇÃO ENTRE O ÍNDICE DE VAZIOS NO ESTADO ENDURECIDO E A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS ARGAMASSAS.....	98
FIGURA 9.13 – RESULTADOS DA ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO ATRAVÉS DO TEMPO.....	99
FIGURA 9.14 – RESULTADOS DA ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO EM RELAÇÃO AO ÍNDICE DE VAZIOS NO ESTADO ENDURECIDO.....	100
FIGURA 9.15 – RESULTADOS DA ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO EM RELAÇÃO À PORCENTAGEM DE VAZIOS DOS AGREGADOS.....	101
FIGURA 9.16 – ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE COM O TEMPO.....	102

FIGURA 9.17 – CORRELAÇÃO OBTIDA NO ENSAIO DE ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE.....	103
FIGURA 9.18 – EVOLUÇÃO DA MANCHA DE ÁGUA DAS AMOSTRAS SUBMETIDAS À ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE.....	104
FIGURA 9.19 – MANCHA D'ÁGA APÓS 72 HORAS DE ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE.....	105
FIGURA 9.20 – APARELHO UTILIZADO PARA O ENSAIO DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO.....	106

## ***Lista de tabelas***

---

TABELA 2.1 – USINAS TERMELÉTRICAS BRASILEIRAS MOVIDAS A CARVÃO MINERAL (POZZOBON, 1999). .....	7
TABELA 3.1 – CLASSIFICAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DE ARGAMASSAS PARA REVESTIMENTO (CSTB, 1990). .....	22
TABELA 5.1 – LAUDO TÉCNICO DO CIMENTO PORTLAND CP-II-F ITAMBÉ (JUNHO/2001). .....	32
TABELA 5.2 – LAUDO TÉCNICO DA CAL HIDRATADA CH III (CAL GULIN, JUNHO/2001). .....	33
TABELA 5.3 – ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DAS AREIAS. ....	34
TABELA 5.4 – MASSA UNITÁRIA E MASSA ESPECÍFICA DAS FRAÇÕES DE AREIA. ....	36
TABELA 5.5 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DAS CINZAS PESADAS UTILIZADAS NO ESTUDO EXPERIMENTAL. ....	38
TABELA 5.6 – ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DAS CINZAS CHARQUEADAS E JORGE LACERDA. ....	39
TABELA 5.7 – MASSA UNITÁRIA E MASSA ESPECÍFICA DAS CINZAS CHARQUEADAS E JORGE LACERDA. ....	40
TABELA 5.8 – ÁREA DE SUPERFÍCIE ESPECÍFICA DAS CINZAS CHARQUEADAS E JORGE LACERDA. .	41
TABELA 6.1 – NÚMERO DE TERMOS (M) DA PROGRESSÃO GEOMÉTRICA. ....	46
TABELA 6.2 – DETERMINAÇÃO DO VOLUME DE VAZIOS V. ....	47
TABELA 6.3 – PARÂMETROS DETERMINADOS PARA A COMPOSIÇÃO DA CURVA GRANULOMÉTRICA. ....	49
TABELA 6.4 – VALORES CALCULADOS PARA A CURVA GRANULOMÉTRICA TEÓRICA. ....	50
TABELA 6.5 – QUANTIDADE DE VOLUME ABSOLUTO RETIDO PARA CADA DIÂMETRO. ....	52

TABELA 6.6 – RESUMO DO TRAÇO EM % DE VOLUME RETIDO. ....	52
TABELA 6.7 – CONVERSÕES EM MASSA PARA O TRAÇO DA ARGAMASSA REF 0% .....	54
TABELA 6.8 – CONVERSÕES EM MASSA PARA O TRAÇO DA ARGAMASSA CH 50% .....	54
TABELA 6.9 – CONVERSÕES EM MASSA PARA O TRAÇO DA ARGAMASSA CH 100% .....	54
TABELA 6.10 – CONVERSÕES EM MASSA PARA O TRAÇO DA ARGAMASSA JL 50% .....	55
TABELA 6.11 – CONVERSÕES EM MASSA PARA O TRAÇO DA ARGAMASSA JL 100% .....	55
TABELA 6.12 – RESUMO DOS TRAÇOS EM MASSA.....	56
TABELA 6.13 – COEFICIENTES DE UNIFORMIDADE ( $C_{UN}$ ) E DE CURVATURA ( $C_c$ ) DAS ARGAMASSAS. .....	57
TABELA 6.14 – VARIAÇÕES DE DIÂMETROS DAS CINZAS. ....	59
TABELA 7.1 – CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS AGREGADOS COMPOSTOS.....	61
TABELA 7.2 – COMPOSIÇÃO DOS TRAÇOS EM MASSA. ....	63
TABELA 7.3 – COMPOSIÇÃO DOS TRAÇOS EM VOLUME.....	63
TABELA 7.4 – RELAÇÃO DOS MATERIAIS EM MASSA. ....	64
TABELA 7.5 – RELAÇÃO DOS MATERIAIS EM VOLUME.....	64
TABELA 8.1 – CARACTERÍSTICAS DE DOSAGEM DAS ARGAMASSAS E CARACTERÍSTICAS DOS AGREGADOS COMPOSTOS. ....	67
TABELA 8.2 – ÁREA ESPECÍFICAS DAS FRAÇÕES DE CINZA.....	67
TABELA 8.3 – DIÂMETROS DE ESPALHAMENTO E PORCENTAGENS DE PERDA DE TRABALHABILIDADE.....	71
TABELA 8.4 – CONSUMO DE MATERIAIS EM MASSA E CONSUMO DE PASTA.....	74
TABELA 8.5 – ÍNDICE DE RETENÇÃO DE ÁGUA DAS ARGAMASSAS. ....	78
TABELA 8.6 – MASSAS ESPECÍFICAS DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO.....	80



TABELA 8.7 – VOLUME DE ÁGUA EXSUDADA ACUMULADA EM RELAÇÃO AO VOLUME DE ÁGUA INICIAL. ....	84
TABELA 8.8 – TEMPOS DE INÍCIO, FIM E DURAÇÃO DA PEGA NAS ARGAMASSAS. ....	87
TABELA 9.1 – VALORES DAS MASSAS ESPECÍFICAS NO ESTADO ENDURECIDO. ....	93
TABELA 9.2 – COEFICIENTES DE ABSORÇÃO DAS ARGAMASSAS. ....	103
TABELA 9.3 – RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO COM OS RESPECTIVOS COEFICIENTES DE VARIAÇÃO.....	107
TABELA 9.4 – FORMA DE RUPTURA DAS AMOSTRAS SUBMETIDAS AO ENSAIO DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO.....	107
TABELA 10.1 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS COM OS RESULTADOS DE LENZI (2001). .....	111

## ***Lista de abreviações***

---

Å	Angström
a/agl.	Relação água/aglomerantes
a/c	Relação água/cimento
a/mat.secos	Relação água/materiais secos
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
ATD	Análise Térmica Diferencial
CASAN (SC)	Companhia de Saneamento do Estado de Santa Catarina
C <sub>c</sub>	Coeficiente de curvatura
CH	Cinzas pesadas provenientes da Usina Termelétrica Charqueadas
CH-III	Cal Hidratada, classe III pela NBR 7175, 1992
CP II – F	Cimento Portland com adição de filler calcário
C-S-H	Silicato de Cálcio Hidratado
CSTB	Centre Scientifique et Technique du Bâtiment.
C <sub>un</sub>	Coeficiente de uniformidade
czp	Cinza pesada
d <sub>10</sub>	Diâmetro correspondente à abertura de malha da peneira em que passa 10% do material em massa
d <sub>30</sub>	Diâmetro correspondente à abertura de malha da peneira em que passa 30% do material em massa
d <sub>60</sub>	Diâmetro correspondente à abertura de malha da peneira em que passa 60% do material em massa
DRX	Difração de Raios x
I <sub>v</sub>	Índice de vazios
JL	Cinzas pesadas provenientes do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda
ME	Massa específica aparente em g/cm <sup>3</sup>
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MPa	Mega Pascal
MU	Massa unitária em g/cm <sup>3</sup>

NBR	Norma Brasileira de referência
PVC	Policloreto de vinila
$R^2$	Coeficiente de correlação linear
RILEM	Réunion International des Laboratoires D'Essais et Matériaux
SC	Estado de Santa Catarina
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina

## **Resumo**

---

O aproveitamento de resíduos sólidos industriais representa uma alternativa benéfica tanto para as indústrias geradoras quanto para a construção civil. A cinza pesada do carvão mineral, resultante dos processos de queima deste produto nas usinas termelétricas, é um subproduto conhecido e abundante, porém pouco explorado. Desta forma, se faz necessário pesquisar aplicações tecnológicas para essas cinzas, visando a redução do impacto ambiental causado pela disposição desse resíduo.

Neste contexto, o presente trabalho apresenta o estudo da incorporação das cinzas da combustão do carvão mineral, em substituição ao agregado natural geralmente utilizado na confecção de argamassas de revestimento. As argamassas foram dosadas por uma curva granulométrica teórica, envolvendo a granulometria dos agregados e aglomerantes, obtida através da equação matemática proposta por FURNAS (1931). A proporção em volume absoluto foi fixada em 25% de aglomerantes (cimento e cal) e 75% de agregados (areia e cinzas). Foram feitas substituições em volume absoluto nos teores de 0%, 50% e 100% da areia por cinzas provenientes de dois processos termelétricos distintos, totalizando cinco traços de argamassas.

O princípio para a composição e dosagem de uma argamassa com base na curva granulométrica consiste em obter uma argamassa trabalhável no estado fresco e que possua, no estado endurecido, uma compacidade elevada. A veracidade da afirmação anterior e a influência de dois tipos de cinzas no desempenho das argamassas foram investigadas através da análise das propriedades das argamassas nos estados fresco e endurecido.

Os resultados demonstraram a viabilidade da utilização das cinzas pesadas em argamassas de revestimento, além de comprovarem que o desempenho das argamassas pode ser melhorado através da otimização granulométrica dos agregados compostos por areia e cinza.

## ***Abstract***

---

Since this moment, researches have been done in order to show alternatives for disposal of mineral coal ashes, using this residue as material for building materials.

This work attempts to find alternatives for the use of bottom ashes to produce mortars. For such, it was considered the ashes resulting from mineral coal combustion at two power plants in south of Brazil.

The equation for grading developed by FURNAS (1931) was used. The continuously graded aggregate gives best results in mortars because of the remarkable workability combined with good packing.

A study of various fresh and hardened properties of mortars is reported to evaluate the influence of the grading adopted and the two types of ashes in mortars. Standardized tests were conducted on five series of mortars having a constant series of solid constituents, with proportions of **25%** (cement and lime) and **75%** aggregates (sand and ashes) in absolute volume. This series represent mortars with 0%, 50% and 100% of the total dry volume of the natural aggregate replaced by bottom ashes from two different sources.

From the experimental tests results, it has been observed the viability of the use of bottom ashes in mortars. It was also found that the continuously grading aggregate has a very significant role improving on the mortar's properties.

**PARTE I – Introdução e dados de literatura**

**PARTE II – Procedimento experimental**

**PARTE III – Análise dos dados coletados**

**PARTE IV – Conclusões e Recomendações**

**PARTE V – Bibliografia e anexos**

# 1 Introdução

---

Os edifícios alteram significativamente o meio-ambiente, seja na fase de produção ou de uso. Reportagens publicadas em revistas e jornais sugerem que o volume de recursos naturais utilizados pela construção civil, muitos deles não-renováveis, corresponde a pelo menos um terço do total consumido anualmente por toda a sociedade.

A extração descontrolada de matérias-primas não renováveis pode levar ao esgotamento de reservas e perdas na biodiversidade. O setor da construção envolve uso intensivo de energia, que corresponde a 40% da energia utilizada mundialmente a cada ano. Aproximadamente 80% desse valor são consumidos no beneficiamento, produção e transporte de materiais, que também produzem emissões que provocam aquecimento global (efeito estufa), chuva ácida e poluição do ar (SILVA et al, 1999).

Diversas políticas ambientais estão sendo adotadas mundialmente, com medidas invariavelmente orientadas para o aumento do volume de reciclagem, da durabilidade dos materiais e da flexibilidade dos projetos e/ou a redução do consumo energético.

A análise de fluxo de energia e materiais é própria para o desenvolvimento de produtos e ajuste de processos industriais. Em seu estado atual, porém, a aplicação da Análise do Ciclo de Vida à avaliação de produtos para a construção depara-se com duas limitações importantes: a ausência de dados confiáveis suficientes para abranger a diversidade de materiais utilizados na produção de um edifício e a falta de consenso quanto ao critério de ponderação dos diferentes indicadores ambientais diante de cada situação específica. No caso da avaliação de edifícios, essas barreiras são potencializadas em função do grande número de itens envolvidos, procedentes de diferentes segmentos industriais.

Essas constatações evidenciam a importância da participação dos fabricantes e sua responsabilidade no processo e a necessidade de considerável investimento em pesquisa para o traçado do perfil ambiental de materiais e componentes, usados na construção, condizentes com a realidade fabril nacional, como uma etapa que precede a implementação de qualquer metodologia de avaliação do impacto de edifícios.

A quase totalidade das pesquisas que estão sendo desenvolvidas mundialmente encontra-se ainda nesse primeiro estágio de conhecimento, centrado na edificação da vida útil potencial e na coleção de perfis ambientais de materiais e componentes. Ampla pesquisa é necessária em praticamente todas as frentes de atuação.

O uso de novos materiais na indústria da construção civil, sobretudo os materiais provenientes de resíduos industriais, tem sido cada vez mais intenso. Existem pelo menos duas razões básicas que induzem a essa realidade: a primeira deve-se ao grande volume de materiais que a construção civil demanda, e a segunda é devido à vinculação do tema, à valorização e ao uso de resíduos industriais no setor da construção civil e na área de proteção ambiental.

Entre esses resíduos encontram-se as cinzas da combustão do carvão mineral. Com o propósito de se obter um melhor desempenho na queima do carvão, a maioria das usinas termelétricas moem o carvão a uma finura onde 75%, em massa do minério, passa pela peneira #200 (0,075mm). O carvão moído é então pulverizado no interior da caldeira, passando por várias zonas de temperatura onde a matéria volátil e o carbono são queimados, enquanto as impurezas minerais são fundidas e permanecem em suspensão nos gases da combustão. Ao deixar a zona de combustão, as partículas de cinza fundidas são resfriadas rapidamente, solidificando-se como partículas esféricas vítreas (LENZI, 2001).

Por suas características físico-químicas, o uso desses subprodutos da queima de carvão mineral é associado a produtos que contenham hidróxido de cálcio  $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ . Estes são geralmente a cal hidratada e/ou cimento Portland, que misturados com as cinzas de carvão e em presença de água reagem quimicamente, combinando o hidróxido de cálcio  $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$  dos aglomerantes com óxido de silício  $[\text{SiO}_2]$  na fase vítrea das cinzas e, no caso de associação com o cimento Portland, resultando o C-S-H que melhora as características de desempenho do compósito.

MALHOTRA e MEHTA (1996) acreditam que, no futuro, o uso de cinzas como materiais pozolânicos e cimentantes, virá associado à realização de benefícios ecológicos. “Muitos destes subprodutos contêm elementos tóxicos que podem ser perigosos, se não forem dispostos de maneira segura... A indústria do cimento e do concreto oferece um lugar adequado para os subprodutos pozolânicos e cimentantes porque a maioria dos metais tóxicos presentes nestes subprodutos podem ser



permanentemente enclausurados no interior dos produtos da hidratação do cimento Portland”.

Ao longo do tempo, diversas pesquisas têm procurado encontrar alternativas para a disposição desses resíduos industriais, principalmente como material de aterro e também como material constituinte de produtos manufaturados para a indústria da construção civil.

Por um outro lado, a racionalização, controle do desperdício, economia, competitividade, qualidade e desempenho, são termos que norteiam a nova ordem das construtoras. Mas estes termos sugerem várias ações a serem desenvolvidas para atingir-se a plenitude desta nova ordem. Ações que devem desenvolver-se em todas as etapas do processo construtivo.

Neste contexto, as argamassas também devem ser objeto de investigações para se poder estabelecer as ações necessárias ao seu desenvolvimento. Como a busca de qualidade passa a ser um dos objetivos dos construtores, não se justifica deixar as argamassas relegadas a um segundo plano.

A construção civil e principalmente os materiais por ela empregados apresentam um amplo campo de reciclagem de resíduos provenientes de outros processos industriais. O estudo do emprego de materiais alternativos na construção civil pode, além de procurar solucionar problemas ambientais como destino final destes resíduos industriais, colaborar com respostas para os questionamentos existentes, trazendo novos conceitos de qualidade, propriedades e características dos materiais a serem empregados e ainda buscar uma nova fonte de matéria-prima.

Tendo em vista a grande disponibilidade das cinzas da geração termelétrica nos estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul, busca-se nesta pesquisa uma alternativa de aproveitamento desses resíduos na construção civil, com a incorporação das cinzas pesadas em argamassas de revestimento. Para tanto, contemplam-se as cinzas pesadas provenientes da combustão do carvão mineral em dois processos termelétricos distintos, o do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda, localizado no município de Capivari de Baixo em Santa Catarina, e o da Usina Termelétrica de Charqueadas, localizada no município de Charqueadas no Rio Grande do Sul.

Nesse contexto, este estudo aborda três aspectos principais:

- 1) o ajuste da granulometria da areia e da cinza pesada, objetivando proporcionar um maior fator de empacotamento, com a redução de vazios, para esses agregados;
- 2) a substituição parcial e total de algumas frações do agregado miúdo natural por cinza pesada, permitindo avaliar o desempenho das argamassas com a variação das proporções de substituição;
- 3) a análise do comportamento das argamassas com incorporação de cinzas pesadas provenientes de dois processos termelétricos distintos, o do Complexo Termelétrico de Jorge Lacerda e o da usina Termelétrica de Charqueadas.

A partir de um traço-base de uso consagrado na construção civil (1:2:9 - cimento: cal: areia) foram compostos traços de argamassas variando-se a substituição em volume de areia por cinza pesada, nas proporções de 0%, 50% e 100%, para as cinzas provenientes de cada processo termelétrico, obtendo-se, assim, 5 traços diferentes de argamassas, cujas propriedades nos estados fresco e endurecido foram estudadas.

## ***2 As cinzas da queima de carvão pulverizado***

---

A reciclagem dos rejeitos industriais é, atualmente, uma preocupação constante em vários países, e para isto procuram-se desenvolver novas técnicas de aproveitamento dos referidos materiais.

Este capítulo visa apresentar uma revisão geral dos dados de literatura que abordam aspectos característicos das cinzas de carvão e a utilização das mesmas como matéria-prima para a construção civil.

As pesquisas sobre o uso dessas cinzas no mundo todo, inclusive no Brasil, se concentram na cinza leve, sendo que a cinza pesada possui menor índice de investigação científica. Restringe-se ainda mais se forem consideradas apenas as pesquisas com argamassas.

### **2.1 PROCESSO DE OBTENÇÃO DAS CINZAS**

O aumento, em número e capacidade nominal instalada, das usinas termelétricas em todo o mundo, trouxe consigo preocupações relacionadas à grande quantidade de cinza remanescente da combustão do carvão mineral pulverizado e aos problemas ambientais causados pela deposição desta cinza.

SILVA et al (1997) relatam que a demanda mundial de carvão até o ano de 2020 é crescente, sendo que nos próximos anos deverá duplicar. Ele aponta como razões deste crescimento a abundância e facilidade de extração do carvão, bem como o domínio da tecnologia da queima do carvão e a falta de outras fontes de energia que possam substituir a gerada pelo carvão em economia. Por esse crescimento no consumo do carvão para geração de energia, também haverá um crescimento na produção de cinzas.

A história da geração de energia elétrica no Brasil já ultrapassa um século. A primeira usina termelétrica brasileira foi construída em Campos (Rio de Janeiro) nos idos de 1883. Em Juiz de Fora (Minas Gerais), em 1889, foi implantada a primeira usina

hidrelétrica do país, pioneira também na América do Sul. Ao longo do ano de 1997, a energia elétrica total produzida no Brasil, incluindo autoprodutores, atingiu o montante de 321,6TWh. Desse valor, 3,2% foram geradas pelas usinas termelétricas (POZZOBON, 1999).

No Brasil a tendência é crescente no consumo de carvão para a produção de energia elétrica, devido a atual crise energética. Um outro fator que estimula ainda mais a busca deste tipo de energia está na constância do fornecimento da mesma, já que não depende das condições climáticas, como é o caso das hidrelétricas.

Os aspectos geográficos brasileiros influenciam diretamente na utilização do combustível empregado na geração de energia térmica. As usinas brasileiras em atividade, que empregam carvão mineral como combustível, estão situadas geograficamente junto aos principais jazimentos carboníferos do país, nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná. A tabela 2.1 indica a localização e a capacidade nominal dessas usinas.

Tabela 2.1 – Usinas termelétricas brasileiras movidas a carvão mineral (POZZOBON, 1999).

USINA TERMELÉTRICA	LOCALIZAÇÃO	CAPACIDADE NOMINAL INSTALADA (MW)
Charqueadas	Charqueadas (RS)	72
Presidente Médice	Candiota (RS)	446
São Jerônimo	São Jerônimo (RS)	20
Jorge Lacerda	Capivari de Baixo (SC)	832
Figueira	Figueira (PR)	20
Total		1390

As reservas de carvão mineral no Brasil, estimadas em 32 bilhões de toneladas, concentram-se, principalmente, no Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Segundo ROCHA et al (1999), a produção das cinzas geradas no Complexo Termelétrico Jorge Lacerda, localizado no município de Capivari de Baixo, em Santa Catarina, é estimada em 818 mil toneladas ano.

O carvão mineral, após sua extração, passa por um processo de beneficiamento de redução de impurezas, como argilas, arenitos e xistos argilosos, chamados resíduos de lavra, que cobrem ou estão intercalados com as camadas de carvão (RISSATO e SOUZA, 1985).

O carvão moído é pulverizado no interior da caldeira passando por várias zonas de temperatura em que a matéria volátil e o carbono são queimados, enquanto que as

impurezas minerais são fundidas e permanecem em suspensão nos gases da combustão. Ao deixar a zona de combustão, as partículas de cinza fundidas são resfriadas rapidamente (de 1500°C para 200°C em poucos segundos), solidificando-se como partículas esféricas vítreas. Algumas dessas partículas se aglomeram para formar as **cinzas pesadas (*bottom ashes*)** que caem no fundo da caldeira e são recolhidas por esteiras rolantes, enquanto que as demais são transportadas com o fluxo do gás da combustão, chamadas **cinzas volantes ou cinzas leves (*fly ashes*)**, e são em grande parte captadas por uma série de separadores mecânicos e precipitadores eletrostáticos ou filtros (LENZI, 2001).

Conforme POZZOBON (1999), no Complexo Termelétrico Jorge Lacerda, o armazenamento dessas cinzas é diferenciado. As cinzas pesadas, após desmanche dos grumos, são bombeadas com água para as lagoas de decantação, permanecendo ali até o completo preenchimento dessas lagoas, quando então são removidas e aplicadas em área de recuperação ambiental. As cinzas leves, em função do manejo a seco, são depositadas em silos e parcialmente vendidas para uso na fabricação de cimentos. De maneira geral, para cada 100 toneladas de carvão mineral consumidas no Complexo Termelétrico Jorge Lacerda, são geradas 42 toneladas de cinzas, das quais 70% é extraída seca e 30% úmida (figura 2.1).

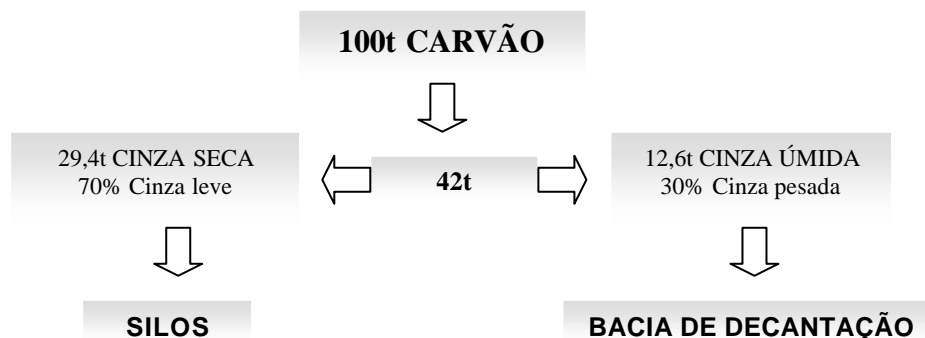


Figura 2.1 – Fluxo da cinza do carvão mineral no Complexo Termelétrico Jorge Lacerda (POZZOBON, 1999).

É importante ressaltar o elevado teor de umidade das cinzas pesadas, que atinge valores maiores que 30% em peso, em comparação às cinzas secas, em que o teor de umidade é 0%. Essa umidade presente nas cinzas pesadas é decorrente dos processos de extração e manuseio sendo, desta forma, bastante variável, mas mantendo-se sempre elevada.

## 2.2 CARACTERÍSTICAS DAS CINZAS

A composição das cinzas depende das características mineralógicas e das condições de queima do carvão.

POZZOBON (1999) afirma que, dentre os resíduos industriais originados, a cinza do carvão mineral ocupa lugar de destaque, por estar presente na maioria dos processos de geração de energia. As cinzas são formadas a partir de componentes não combustíveis de carvão e, também, de partículas não queimadas devido à combustão incompleta do carvão pulverizado na câmara de combustão, em temperatura variável entre 1200 e 1600°C.

O carvão mineral produzido e utilizado no Brasil como combustível, em complexos energéticos e industriais, contém altos teores de matéria mineral (até 60%) responsável pela geração dos resíduos (SILVA et al, 1997).

Devido às suas características físico-químicas, a cinza seca ou volante gerada é vendida às cimenteiras e concreteiras, que as empregam na produção do cimento Portland ou como adição mineral ao concreto; todavia, as cinzas pesadas não alcançam o mesmo mercado, constituindo assim um grande problema de ordem ambiental (ROCHA et al, 1999).

A utilização potencial da cinza volante é principalmente controlada pela sua composição química, embora a finura das partículas também seja uma importante consideração. Já a utilização potencial das cinzas pesadas é determinada pelas suas características físicas, como a distribuição granulométrica. A textura normalmente áspera, fundida e vitrificada da cinza pesada faz dela um substituto ideal para os agregados naturais (CHERIAF et al, 1999).

As cinzas pesadas são materiais cuja composição depende da composição do carvão; do grau de beneficiamento e moagem do carvão; tipo, projeto e operação da caldeira; e do sistema empregado para extração e manuseio das cinzas (ROCHA et al, 1999).

Estes fatores revelam a necessidade de uma caracterização completa das cinzas, a fim de viabilizar a definição das condições tecnológicas para sua aplicação na construção civil.

### 2.2.1 Composição química e classificação das cinzas

Nos estudos feitos por CHERIAF e ROCHA (1997), que investigaram as propriedades das cinzas provenientes do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda, e por PIAZZA e RUI (1999) que avaliaram as cinzas provenientes da Usina Termelétrica Charqueadas, pode-se verificar que ambas as cinzas pertencem à classe F segundo a classificação da ASTM C618, devido ao percentual de  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 70\%$  e ao teor de CaO inferior à 10%.

A cinza pesada do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda possui um maior teor de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  em detrimento aos teores de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  que, segundo CHERIAF e ROCHA (1997), está relacionado principalmente à presença de sulfeto (pirita e marcassita) nos carvões minerais. Ao observar a composição química das cinzas provenientes da Usina Termelétrica Charqueadas constata-se que tantos os teores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  quanto os de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  são um pouco maiores nas cinzas pesadas em comparação às cinzas leves. As cinzas geradas em ambos processos termelétricos possuem um teor de cálcio abaixo de 2%.

O conteúdo de carbono nas cinzas é evidenciado pelo valor de perda ao fogo. As cinzas pesadas apresentam, contudo, perda ao fogo consideravelmente superior à das cinzas leves, ocorrendo um aumento da ordem de 400% para as cinzas pesadas de Jorge Lacerda e de 145% para as cinzas pesadas de Charqueadas. Tal fato se deve à presença de carvão não queimado identificado, mesmo através de exame visual, nas cinzas pesadas.

### 2.2.2 Reação pozolânica das cinzas

A NBR 12653 (1994), qualifica os materiais pozolânicos como *“materiais silicosos ou silicoaluminosos que, por si sós, possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que, quando finamente divididos e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes”*.

O principal efeito da cinza é o “efeito de pó finamente dividido”. A cinza volante aumenta o espaço disponível na estrutura criada pelas partículas de cimento, aumentando assim a hidratação do cimento. Com o progresso da hidratação do cimento, as partículas de cinza volante reagem quimicamente com  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{OH}^-$  e  $\text{SO}_4^{2-}$  para formar produtos de hidratação adicionais. Silicato de cálcio hidratado, aluminato de cálcio

hidratado e aluminosulfato de cálcio hidratado são positivamente identificados (XU, 1993).

A evolução das propriedades pozolânicas de materiais finamente divididos pode ser avaliada por muitos procedimentos e usando diferentes técnicas. Em algumas destas técnicas, é necessário um longo período de tempo para a realização dos testes, por exemplo, quando a atividade pozolânica das cinzas volantes é determinada através da evolução da resistência à compressão com o tempo em argamassas e concretos, assim como pela determinação do teor de hidróxido de cálcio através de técnicas de análises térmicas.

CHERIAF et al (1999) avaliaram as propriedades pozolânicas de cinzas pesadas da combustão do carvão utilizando três categorias de testes: químico, físico e mecânico. A reatividade pozolânica foi avaliada em composições de pasta de cal e cinzas. Empregando-se as técnicas de difração de raios-X (DRX), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e análise térmica diferencial (ATD) os autores identificaram fases hidratadas em argamassas padronizadas com substituição da areia pelas cinzas.

A reação pozolânica pode também ser avaliada quando as misturas de cimento ou cal são curadas em temperaturas elevadas. Desta maneira, o período de teste para determinação da reação pozolânica é decrescido (PAYÁ, 2001).

HANEHARA et al (2001) desenvolveram um método para a determinação da reação proporcional da cinza volante usando o resíduo insolúvel e uma quantidade de  $Al_2O_3$  dissolvida da pasta de cimento, e investigaram em detalhes o efeito da reação proporcional da cinza volante com o avanço da idade da pasta de cimento endurecida.

### *2.2.3 Características físicas das cinzas*

Várias pesquisas têm sido feitas investigando a utilização das cinzas como matéria-prima para a construção civil. A maioria desses estudos aborda especificamente a atividade pozolânica deste material relacionadas às características químicas em detrimento às suas características físicas. A importância da investigação das características físicas das cinzas está baseada na determinação da reatividade pozolânica dos grãos de diferentes granulometrias.



ERDOGDU e TÜRKER (1999) estudaram diferentes frações de cinzas volantes utilizadas na substituição parcial do cimento em argamassas. Foram utilizadas cinzas com alto teor de CaO (12,69%) e com baixo teor de CaO (2,24%).

As cinzas foram separadas pelas peneiras com malhas de 125, 90, 63 e 45  $\mu\text{m}$ , e o material retido em cada peneira foi utilizado no procedimento experimental. Desta forma, seis grupos diferentes, incluindo um constituído pelas cinzas com todas as frações, foram obtidos dos dois tipos de cinza.

As misturas utilizadas nos testes de resistência à compressão foram compostas por 25% de cinzas volantes e 75% de cimento, em peso. Os melhores resultados de resistência, realizados nas idades de 2, 7, 28 e 90 dias, foram obtidos com as cinzas de alto teor de CaO, sendo que, para os dois tipos de cinzas, quanto mais fina a fração utilizada, maior a resistência à compressão. No artigo os autores não citam o tipo de cura utilizado.

Todas as frações de cinzas foram analisadas quanto à composição química de óxidos totais, não sendo encontradas variações significantes nas cinzas com baixo teor de CaO. Já as cinzas com alto teor de CaO, a porcentagem de  $\text{SiO}_2$  diminuiu com o decréscimo de diâmetros das frações, enquanto as porcentagens de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{SO}_3$  aumentaram.

Desta forma, foi deduzido que as variações da resistência nas argamassas produzidas com as diferentes frações da cinza de baixo teor de CaO ocorreram principalmente devido aos diferentes tamanhos de partículas.

De forma teórica, os autores estimaram os valores da resistência à compressão para as argamassas confeccionadas com as cinzas contendo todas as frações. O cálculo foi feito utilizando os dados da análise química de cada fração e a quantidade percentual de cada fração presente na cinza. Para ambos os tipos de cinza, os resultados calculados ficaram abaixo dos resultados verdadeiros. Isto foi atribuído ao efeito da granulometria. Como as frações isoladas possuíam uma granulometria muito uniforme, o empacotamento dos grãos foi prejudicado. Sendo assim, nas argamassas com adições das cinzas originais, os diferentes tamanhos de partículas preenchem os poros existentes entre os grãos, melhorando o empacotamento, e um valor de resistência maior que o esperado pôde ser obtido.

RANGANATH et al (1998) examinaram o papel dos diferentes tamanhos de partículas de cinzas oriundas de várias lagoas de decantação (compostas por cinza pesada e cinza volante). Estas cinzas foram separadas em 3 frações: fração F (com tamanhos predominantes menores que 20 $\mu$ m); fração M (tamanhos predominantes entre 20 $\mu$ m e 75 $\mu$ m) e fração C (tamanhos predominantes entre 75 $\mu$ m e 150 $\mu$ m). Foram avaliadas as características físicas, químicas e mineralógicas das partículas, bem como a reatividade com cal das diferentes frações.

Dentre as características físicas, a fração F (< 20 $\mu$ m) apresentou maiores valores de massa específica e reatividade com cal, enquanto as frações (75 $\mu$ m e 150 $\mu$ m) obtiveram baixos resultados. Com isso os autores concluíram que partículas maiores de 75 $\mu$ m afetam negativamente as características de pozolanicidade das cinzas de bacias.

A fração C apresentou uma perda de massa ao fogo em torno de 50% superior à fração F. Na fração F observou-se maior quantidade de sílica solúvel, sugerindo, segundo os autores, partículas mais reativas. A difração de raios-X (DRX) indicou a presença de fase vítrea maior na fração F em comparação com a fração M. Na fração F, através da microscopia eletrônica de varredura (MEV), foram observadas partículas bastante esféricas e a presença de partículas com tamanhos iguais a 1 $\mu$ m e 2 $\mu$ m. Na fração M, foram observadas partículas pouco esféricas e, na fração C, partículas largas, sinterizadas e de superfície irregular.

Os autores, através da análise das micrografias das argamassas rompidas aos 7 dias, constataram que na fração F houve o começo da reação pozolânica evidenciada pela desintegração de algumas partículas. A análise da porosidade por Intrusão de Mercúrio nas diferentes argamassas aos 7 e 28 dias, evidenciou a baixa pozolanicidade da fração C devido ao tamanho dos poros (500 Å) aos 28 dias. Na mesma idade, a quantidade de poros de grandes dimensões é menor para as outras frações.

As argamassas foram testadas quanto à resistência à compressão aos 3, 7, 14, 28 e 90 dias. Em todas as idades, a fração C apresentou menores valores de resistência. Os autores justificam a baixa reação pozolânica desse material pela presença reduzida (ou nula) de partículas menores de 45 $\mu$ m que, segundo os mesmos, são responsáveis pela produção de pontos de nucleação para a reação pozolânica.

Para idades inferiores a 14 dias, os valores de resistência à compressão das argamassas são similares. A partir dessa idade, a fração F apresentou os melhores

valores de resistência aos 28 e 90 dias. A resistência da argamassa confeccionada com a fração C obteve uma tendência de crescimento similar ao das outras frações até os 28 dias, não acompanhando os aumentos de resistência das outras frações para os 90 dias de idade.

Desta forma, os autores concluíram no escopo de seus estudos que as lagoas apresentam dois tipos de partículas de cinzas, as pequenas e reativas assim como as grandes e pobremente reativas. De todas as partículas, apenas as inferiores a 75µm (cerca de 65% do total analisado) puderam ser consideradas reativas e pozolânicas.

KIATTIKOMOL et al (2001) tiveram como meta de investigação as propriedades das cinzas volantes de granulometria grossa moída, provenientes de cinco fontes da Tailândia. Essas cinzas apresentaram forma, tamanho e composição química completamente diferentes. As cinzas foram fracionadas e moídas em três finuras diferentes, variando seus tamanhos médios entre 1,9 e 17,2µm.

Para a investigação da atividade pozolânica do material, através de testes de resistência à compressão, foram moldados cubos de argamassa com 5cm de aresta, com substituição de 20% do cimento Portland, em massa, pelas cinzas moídas.

Os resultados revelaram que o grau de reatividade pozolânica das cinzas de granulometria grossa aumenta com o decréscimo do tamanho das partículas moídas, ou seja, quanto mais fina a partícula de cinza, maior a reação pozolânica. Quando o tamanho da partícula de cinza é menor que 9µm, o ganho de resistência é superior a 100% aos 28 dias em relação à argamassa de referência (sem adição de cinzas).

Os resultados deste estudo mostraram que a finura da cinza, e não a composição química, foi o maior fator afetando o ganho de resistência das argamassas de cinza volante e cimento.

CHERIAF et al (1999) submeteram uma amostra de cinza pesada, oriunda da Usina Termelétrica Jorge Lacerda, ao ensaio de reatividade pozolânica com cal. Os índices de atividade foram maiores que a reatividade com o cimento, chegando à conclusão que a cinza pesada é apropriada para ser usada em artefatos de cimento, como o concreto.

Também foram estudadas por estes pesquisadores as diferenças das atividades pozolânicas de uma amostra de cinza pesada quando submetida à moagem por um

período de até 6 horas. Foi concluído que a moagem da cinza pesada melhora a sua reação pozolânica, já que o índice de atividade pozolânica aumentou 27% quando a cinza pesada foi moída por 6h.

Outro fator importante nas características físicas das cinzas está relacionado à baixa densidade das partículas em relação às densidades dos materiais geralmente empregados em artefatos de cimento.

MEHTA e MONTEIRO (1994) mostram, pela análise de microscopia, que a maior parte das partículas presentes nas cinzas volantes ocorrem como esferas sólidas de vidro, mas às vezes pode ocorrer entre elas um pequeno número de esferas ocas, chamadas cenosferas (completamente vazias) e plerosferas (preenchidas com muitas esferas pequenas).

KOLAY e SINGH (2001) estudaram cenosferas oriundas de lagoas de decantação de uma termelétrica a carvão indiana, quanto as suas características físicas, químicas, mineralógicas e térmicas. Foram coletadas as cinzas que ficavam flutuando nas bacias de decantação. Elas possuíam tamanhos entre 30 $\mu$ m e 55 $\mu$ m, massa específica de 0,78g/cm<sup>3</sup>, e área específica de 45,7m<sup>2</sup>/kg, muito menor que a cinza coletada nos precipitadores eletrostáticos, que segundo os autores é devido a perfeita esfericidade e uniformidade do material.

Os autores identificaram como cenosferas, esferas ocas, leves e inertes constituídas principalmente de sílica e alumina, preenchidas com ar ou gases aprisionados (geralmente com bolha de CO<sub>2</sub> e N<sub>2</sub>) vindo do derretimento de material de resíduo inorgânico do carvão. Foi afirmado que a quantidade de cenosferas presentes na cinza depende da porcentagem de carbono e ferro no carvão. Segundo a análise química a perda de massa ao fogo foi de 4,2% e a porcentagem de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O foram de 53,53%, 30,01% e 7,53%, respectivamente. Através da análise termogravimétrica (ATG) os autores observaram a 300°C e perda de massa maior de 90%, atribuindo ao fato da expulsão do ar ou gás aprisionado nas cenosferas. Já pela análise térmica diferencial (ATD) observaram um pequeno pico endotérmico aos 330°C, sendo atribuído a expulsão da água dissolvida no material vítreo das amostras.

CHERIAF et al (1999) identificaram a presença significativa de partículas ocas (cenosferas e plerosferas) nas cinzas pesadas provenientes de Jorge Lacerda, atribuindo à essa morfologia a baixa massa específica encontrada (2,0 g/cm<sup>3</sup>). Os autores mostraram, através de micrografias, que na cinza pesada ocorre a presença tanto de

partículas esféricas ou arredondadas como a de partículas totalmente irregulares. A granulometria, realizada por granulômetro a laser, mostrou que 100% das partículas são menores que 100 $\mu$ m e 2% são menores que 1 $\mu$ m, sendo o diâmetro médio das partículas igual a 35 $\mu$ m.

## 2.3 AS CINZAS DE CARVÃO UTILIZADAS EM ARGAMASSAS

No Brasil, onde não há normalização para o uso da cinza do carvão mineral produzida em usina termelétrica, o emprego sistemático de cinza volante como pozolana iniciou na década de sessenta, com a construção das estruturas de concreto do aproveitamento hidrelétrico de Jupia (ABREU (1993) *apud* POZZOBON (1999)).

O apelo do uso de cinza substituindo parte do clínquer, na produção do cimento composto, é um modo seguro e barato da destinação final das cinzas volantes, contribuindo para a conservação da energia usada na fabricação de cimento, e de recursos minerais (calcário e argila) cuja exploração agride o meio ambiente.

Muitos trabalhos já foram feitos a cerca da utilização da cinza volante oriunda de termelétrica, por esta apresentar comprovada propriedade pozolânica. Mas poucos trabalhos são referenciados quanto à utilização da cinza pesada. Segundo o estudo realizado por POZZOBON (1999), o comércio de cinza volante perderá espaço para a cinza pesada somente quando a primeira estiver em falta ou for totalmente utilizada.

MALHOTRA e MEHTA (1996) afirmaram que tipicamente a proporção das cinzas leves: pesadas, geradas no processo de combustão do carvão mineral pulverizado, é de 70: 30. Devido às características mineralógicas e granulométricas, a cinza leve não necessita de qualquer processo de beneficiamento antes de ser usada como adição mineral em materiais aglomerantes hidráulicos. Já a cinza pesada, por apresentar granulometria graúda, menor reatividade e, na maioria dos casos, estar em condição úmida, requer processo de beneficiamento.

POZZOBON (1999), cita que o uso das cinzas de carvão no mundo é, em média, de 30% em relação ao total gerado. Daí pode-se explicar o pequeno número de pesquisas que visam a valorização de cinza pesada para uso na construção civil. Já a pesquisa da cinza volante é muito intensa, com seu uso já consagrado na fabricação de cimento Portland ou em adições em concreto, bem como na fabricação de artefatos de

cimento; no entanto, o uso de cinza leve em argamassas com relação ao concreto e cimento é insignificante. Ainda assim, o uso não atende à demanda da geração desse subproduto, que chega a 42% da cinza leve produzida, restando ainda quase 60%, que são dispostos em bacias de decantação e posteriormente em aterros.

PIAZZA e RUI (1999) estudaram argamassas contendo cinzas pesadas e leves da Termelétrica de Charqueadas, no Estado do Rio Grande do Sul, em substituição total da areia por cinza pesada, e substituição parcial (15% e 30% em peso) da cinza pesada por cinza leve. Nessa análise, consideraram propriedades de resistência à compressão e à tração por flexão, variação dimensional e densidade, além da comparação entre cura sob água e ar. As conclusões deste estudo foram:

- i. as cinzas pesadas apresentam características físicas bastante distintas das cinzas leves e composição química similar;
- ii. os resultados dos estudos realizados indicam a possibilidade de utilização das cinzas pesadas em substituição à areia quartzosa em argamassas e a obtenção de materiais construtivos;
- iii. a substituição de parte das cinzas pesadas por cinzas leves melhora as propriedades mecânicas das argamassas, sendo que a performance está diretamente relacionada com o percentual de substituição dentro do intervalo estudado;
- iv. a cura ao ar não exerce efeitos negativos sobre as propriedades mecânicas dos produtos contendo cinzas pesadas, podendo ser dispensada, por essa razão, a cura imersa em água;
- v. as cinzas pesadas possuem, como as cinzas leves, atividade pozolânica.

As conclusões a que chegaram esses autores são compatíveis com as de outros autores que também investigaram a utilização das cinzas pesadas como matéria-prima para produtos de cimento. Mas, infelizmente no artigo publicado por PIAZZA e RUI (1999), não constam informações importantes como o traço utilizado para a dosagem das argamassas nem a forma de substituição (massa ou volume) da areia por cinzas. Este trabalho somente foi referenciado nesta pesquisa devido ao fato de ser um dos poucos trabalhos publicados com a incorporação de cinzas pesadas em argamassas.

LENZI (2001) utilizou cinzas provenientes do Complexo Termelétrico de Jorge Lacerda, em substituição do cimento por cinzas leves e da areia por cinzas pesadas, na dosagem de argamassas de revestimento. As substituições foram feitas em volume sendo que, para o **cimento**, os teores de substituição foram de 0, 20, 30, 40 e 50% por **cinza leve** e, para a **areia**, os teores de substituição foram de 0, 50 e 100% por **cinza pesada**.

Este estudo chegou à conclusão que a adição das cinzas pesadas aumentou significativamente a resistência à compressão. As resistências das argamassas com 100% de **cinza pesada** (em substituição à **areia**), entre as idades de 7 e 90 dias, tiveram um aumento de 140, 127, 184, 223 e 232%, respectivamente, nas argamassas com teores de 0, 20, 30, 40 e 50% de **cinza leve** (em substituição ao **cimento**), em comparação à argamassa de referência. O período de maior desenvolvimento da resistência das argamassas dosadas com as cinzas foi aquele compreendido entre 28 e 60 dias.

A abundância de matérias-primas para a fabricação de produtos utilizados na construção civil constitui uma importante barreira para o consumo da cinza na fabricação destes produtos, uma vez que a estrutura clássica das empresas de construção civil ainda prefere trabalhar com materiais convencionais. Esse fato demonstra a grande necessidade em se divulgar resultados de pesquisas e em criar instrumentos que estimulem o uso das cinzas pesadas em substituição às matérias-primas empregadas no setor.

### ***3 Influência da granulometria dos agregados no desempenho das argamassas***

---

A influência da distribuição granulométrica do agregado pode ser observada a partir das propriedades das argamassas nos estados fresco e endurecido. Sendo a argamassa composta por aglomerantes e agregados, suas propriedades decorrem de uma interação desses constituintes, podendo ser diferenciadas conforme a distribuição granulométrica do agregado.

Os aglomerantes dão a sua contribuição quando entram em contato com a água de amassamento formando uma pasta – cimento, cal, água e aditivos (quando utilizados), cujas propriedades evoluem através de reações químicas.

Os agregados têm contribuição ativa quando misturados à pasta por processo mecânico ou manual; sua atuação é de natureza física, contribuindo para o desempenho das argamassas nos estados fresco e endurecido. Na revisão bibliográfica apresentada por CARNEIRO (1999) as principais influências dos agregados nas propriedades das argamassas citadas são:

#### ***No estado fresco***

- ✓ formam capilares entre os vazios do agregado que são responsáveis por parte da retenção da água de amassamento;
- ✓ reduzem o consumo de água de amassamento sem perder a trabalhabilidade, se a distribuição granulométrica dos grãos for contínua.

#### ***No estado endurecido***

- ✓ atenuam as tensões oriundas do endurecimento da fração ativa e solicitações exteriores;
- ✓ reduzem a permeabilidade quanto maior for a sua continuidade, por reduzir os vazios entre os grãos;



- ✓ contribuem para o aumento das resistências mecânicas e do módulo de deformação como o aumento da continuidade da curva granulométrica, pois melhoram o empacotamento da mistura.

Além de contribuir nas propriedades nos estados fresco e endurecido, a dosagem racional do agregado pode ser um meio importante para a redução de custos na produção de argamassas, visto que o preço dos agregados ainda é inferior ao do cimento e da cal. Economizar estes aglomerantes é economizar consumo de energia. Outrossim, o uso racional dos agregados possibilitará a preservação das suas fontes de extração.

### **3.1 VISÃO PANORÂMICA SOBRE ARGAMASSAS**

A avaliação da qualidade de argamassas para revestimento envolve a identificação dos fatores que afetam a durabilidade e o desempenho do revestimento, seja a partir das características dos materiais, da mistura dos mesmos e da ação dos fatores externos sobre o revestimento, seja pela associação destes fatores, resultando na necessidade de uma análise das várias inter-relações existentes.

Para CINCOTTO et al (1995) as questões básicas a serem respondidas, a fim de assegurar um desempenho adequado da argamassa são:

- ✓ Quais os referenciais de qualidade a serem atendidos pelo revestimento de argamassa de paredes e teto?
- ✓ Quais as características dos materiais e as propriedades da argamassa e do revestimento que influem sobre estes referenciais de qualidade?
- ✓ A partir dos elementos do item anterior, como pode ser elaborado um programa experimental de avaliação de desempenho da argamassa que possibilite uma seleção adequada da mesma?

Segundo CINCOTTO e CARNEIRO (1999) o panorama nacional do que diz respeito às argamassas pode ser resumido nos seguintes pontos:

- i. a dosagem é tradicionalmente empírica, sendo usualmente recomendados os traços em volume de **1:1:6** e **1:2:9** (cimento: cal: areia), enquanto, na prática, identifica-se o emprego de traços mais pobres, com proporção

aglomerante: agregado, em volume, de **1:6** a **1:9**, não dando qualidade ao revestimento;

- ii. a participação da areia na composição das argamassas é de 80% em massa, não tendo sido levada devidamente em consideração a sua distribuição granulométrica para o desempenho e durabilidade;
- iii. o Brasil é um país de dimensões continentais e apresenta diferentes regiões climáticas, não existindo uma especificação que contemple a adequação para cada região;
- iv. a diversidade de elementos construtivos, notadamente a alvenaria de vedação, que se constituem em bases de assentamento diferentes, requerem argamassas com diferentes poder de retenção de água e de adesão inicial;
- v. um mercado de argamassas industrializadas em franca ascensão, requerendo embasamento tecnológico para uma seleção adequada, levando em conta o desempenho desejado em cada condição de aplicação;
- vi. uma freqüência ainda elevada de fenômenos patológicos em revestimento externo.

Em países desenvolvidos, em que a construção civil tem seus processos construtivos industrializados, a situação é diferente. Neles as argamassas são industrializadas, vêm prontas para serem aplicadas e de maneira mecânica, formuladas para diferentes climas regionais e absorção de base, uso para revestimento interno ou externo e, ainda, com instruções de aplicação. A França pode ser tomada como modelo: possui mais de 200 tipos de argamassas homologadas pelo CSTB – *Centre Scientifique et Technique du Bâtiment*. Embora não exista um documento de recomendação geral de tipo de argamassa para cada situação, o CSTB criou a classificação MERUC (tabela 4.1), que engloba todos os seus tipos, com base nas cinco propriedades seguintes:

**M** – massa específica no estado endurecido ( $\text{kg/dm}^3$ );

**E** – módulo de deformação (MPa);

**R** – resistência à tração na flexão (MPa);

**U** – retenção de umidade (%) e

**C** – coeficiente de capilaridade ( $\text{g/dm}^2 \cdot \text{t}^{1/2}$ ).

**Tabela 3.1 – Classificação das características de argamassas para revestimento (CSTB, 1990).**

Classe	M	E	R	U	C
	kg/dm <sup>3</sup>	MPa	MPa	%	g/dm <sup>2</sup> . min <sup>1/2</sup>
1	< 1,2	< 5.000	< 1,5	< 78	< 1,5
2	1,0 a 1,4	3.500 a 7.000	1,2 a 2,0	75 a 85	1,0 a 2,5
3	1,2 a 1,6	5.000 a 10.000	1,5 a 2,5	82 a 90	2,0 a 4,0
4	1,4 a 1,8	7.500 a 14.000	2,0 a 3,2	88 a 94	3,0 a 7,0
5	1,6 a 2,0	12.000 a 20.000	2,7 a 4,0	92 a 97	5,0 a 12,0
6	> 1,8	> 16.000	> 3,4	96 a 100	> 10

Fonte: CINCOTTO e CARNEIRO (1999).

### 3.2 INFLUÊNCIA DA COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS AGREGADOS NAS PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS

São atribuídas aos agregados as funções de redução dos custos e também a de conferir às argamassas propriedades que a pasta não possui. OLIVEIRA (1989) citada por TRISTÃO (1995) descreve que o agregado atua como um esqueleto sólido que evita em parte as variações volumétricas e sugere um agregado com granulometria que possibilite uma estrutura compacta e que tenha menor superfície específica, pois isso diminui o volume de pasta na argamassa.

SELMO (1989) considera que a distribuição granulométrica da areia influencia o índice de vazios que, por sua vez, interfere no consumo de aglomerante da argamassa.

O índice de vazios ( $I_v$ ) do agregado se torna uma propriedade de grande importância, pois está diretamente relacionado ao volume de pasta (água e aglomerantes) consumido por uma argamassa. A quantidade de vazios presente indica o grau de compactidade, ou fator de empacotamento, do agregado e pode ser calculado com a massa unitária e a massa específica do agregado conforme a equação 3.1:

$$I_v (\%) = (1 - MU/ME) \times 100 \quad \text{Equação 3.1}$$

Sendo:

MU – massa unitária do agregado em  $\text{g/cm}^3$  e

ME – massa específica do grão do agregado em  $\text{g/cm}^3$ .

A massa unitária também é um fator importante a se considerar por estar relacionada à massa específica aparente das argamassas no estado fresco, que aumenta à medida que aumenta a massa unitária do agregado natural (TRISTÃO, 1995).

Essas duas características são relevantes para a avaliação do agregado empregado em argamassa, sobretudo quando for necessária a escolha entre dois tipos de agregado, buscando-se a maior compacidade para a argamassa. No entanto, apenas estes indicadores são insuficientes, necessitando-se ainda da distribuição granulométrica (CARNEIRO, 1999).

Por definição, granulometria de uma areia é a proporção dos vários tamanhos das partículas presentes na areia. Uma análise granulométrica é realizada quando se deseja obter informações quantitativas da distribuição de tamanhos de grãos presentes. Esta análise é realizada a partir do peneiramento do material utilizando-se peneiras de diferentes dimensões de malha. No Brasil estas peneiras estão especificadas na NBR 5734 (1988), onde se utilizam malhas quadradas, cuja abertura é caracterizada pela menor distância entre os bordos de dois fios paralelos que formam os lados opostos do quadrado da malha. Nesta norma estão especificadas as diversas aberturas das malhas das peneiras.

A representação gráfica mais adequada de um material fragmentado envolve a distribuição do tamanho das partículas por massa. Esta distribuição é obtida no peneiramento através das massas das frações retidas ou passantes numa série de peneiras. De posse desta distribuição pode-se traçar as referidas curvas granulométricas que representam a função diâmetros de partículas *versus* porcentagens de ocorrência de um dado material. Nesta análise, nada se pode inferir sobre a forma e o arranjo geométrico de suas partículas.

As leituras das curvas granulométricas podem indicar diferentes tipos de granulometrias. Uma granulometria contínua é aquela que contém todos os tamanhos de grãos, isto é, existe uma distribuição normal de tamanhos de grãos e a curva granulométrica apresenta-se contínua. Já uma granulometria descontínua, também denominada aberta, caracteriza-se pela falta de certas frações granulométricas, e a curva, desta forma, apresenta patamares.

Estas granulometrias podem, ainda, ser classificadas como bem graduadas ou mal graduadas, conforme apresentem, ou não, predomínio de determinadas frações em detrimento de outras. Pode-se ter, ainda, granulometrias denominadas uniformes, que

são formadas por grãos que, aproximadamente, apresentam os mesmos tamanhos. Uma granulometria uniforme apresenta-se graficamente muito inclinada, isto é, com grande coeficiente de declividade, significando uma predominância de poucos tamanhos de grãos.

Observa-se, entretanto, que as definições para caracterizar uma distribuição granulométrica em contínua, descontínua, bem ou mal graduada ou, ainda, uniforme, são qualitativas, deixando margem de dúvida quando de suas interpretações. Assim, uma areia que apresentar todos os tamanhos de grãos, porém com porcentagens distintas, poderá não ter uma granulometria contínua. Ainda, se uma areia apresentar uma concentração de grãos em duas frações granulométricas poderá ser caracterizada como uma granulometria uniforme (TRISTÃO, 1995).

Com a intenção de classificar as granulometrias das argamassas, encontrou-se na mecânica dos solos, conceitos e parâmetros que auxiliam na análise quantitativa das curvas granulométricas. CAPUTO (1988) utiliza, para esse tipo de análise, parâmetros definidos como “diâmetro efetivo” e “grau de uniformidade”, que foram inicialmente utilizados por Allen-Hazen para estudar a permeabilidade das areias usadas para filtros.

O *diâmetro efetivo* é o diâmetro correspondente à abertura de malha em que passam 10% em massa do material total peneirado. O *coeficiente de uniformidade* ( $C_{un}$ ) é a razão entre os diâmetros correspondentes à abertura de malha em que passam 60% e 10% em massa do material total peneirado, tomados na curva granulométrica, conforme a equação 3.2:

$$C_{un} = d_{60} / d_{ef} \quad \text{Equação 3.2}$$

Esta relação indica, na verdade, “falta de uniformidade”, pois seu valor diminui ao ser mais uniforme o material. Consideram-se, na mecânica dos solos, de granulometria muito uniforme os solos com  $C_{un} < 5$ , de uniformidade média se  $5 < C_{un} < 15$  e desuniforme quando  $C_{un} > 15$ .

Define-se ainda, complementarmente, o *coeficiente de curvatura*, segundo a equação 3.3,

$$C_c = (d_{30})^2 / (d_{60} \times d_{ef}) \quad \text{Equação 3.3}$$

onde  $d_{30}$  é o diâmetro correspondente à abertura de malha em que passam 30% em massa do material total peneirado. Para solos bem graduados o valor de  $C_c$  está compreendido entre 1 e 3.

A norma brasileira NBR 7217 (1987) especifica o método de ensaio para determinação da composição granulométrica de agregados para concreto. Nesta norma o resultado é expresso em porcentagem retida e retida acumulada em cada peneira. Além disso, determina-se também a dimensão máxima característica e o módulo de finura do agregado. O módulo de finura é calculado como a soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de um agregado, nas peneiras da série normal dividida por 100.

Existem problemas crônicos associados à granulometria dos agregados. Não se pode esperar que os fornecedores comerciais tenham uma fonte natural constante de matéria-prima, e também não se pode obter resultados confiáveis das suas combinações de agregados. Desta forma, é necessário fazer uma granulometria precisa de agregados através séries de componentes ou frações (PARTON et al, 1989).

Vários autores têm sistematicamente alertado que a influência da composição granulométrica da areia é fator determinante na variação das propriedades das argamassas de revestimento, sendo que a norma brasileira NBR 7200 (1982) prescreve que a granulometria dos agregados deve ser considerada na escolha dos revestimentos (TRISTÃO, 1995).

Conforme CARNEIRO (1999), o princípio para a composição e dosagem de uma argamassa com base na curva granulométrica está em obter uma argamassa trabalhável no estado fresco e que possua, no estado endurecido, uma compacidade elevada, com redução do volume de vazios e com capacidade de deformação.

O mesmo autor, citando as conclusões obtidas dos dados de literatura, diz que as idéias básicas para a definição do método para a obtenção de curvas granulométricas contínuas de argamassas são descritas a seguir, sendo que, a compacidade e a trabalhabilidade ótimas são alcançadas com uma distribuição granulométrica contínua a partir de:

- i. distribuição de tamanho de partículas segundo uma progressão geométrica;
- ii. definição da série de peneiras;
- iii. fração de finos pré-estabelecida;

- iv. razão constante entre as quantidades de materiais retidos nas peneiras de dimensões sucessivas;
- v. relação aglomerante:agregado obtida da curva granulométrica.

RAO (2001) fez uma investigação da influência de cimentos de alta resistência com sílica ativa na resistência de idades tardias para argamassas. Foi estudado o efeito do tamanho e da área de superfície específica do agregado na variação dos valores de resistência à compressão. Através de testes experimentais o autor chegou às seguintes conclusões a respeito da influência da granulometria dos agregados:

- i. o tamanho do grão das partículas de areia influencia a resistência das argamassas. A resistência à compressão aumenta gradualmente e depois sofre um decréscimo com o aumento do tamanho das partículas de areia. A maior resistência foi observada com o tamanho dos grãos variando entre 1,5 e 2,0mm;
- ii. nas misturas com os maiores tamanhos de grãos, as superfícies rompidas revelaram que as fissuras tinham atravessado os grãos, entretanto as fissuras não propagaram através dos grãos com os menores tamanhos;
- iii. o aumento da superfície específica do agregado resulta no aumento da resistência inicial, depois ocorre um decréscimo gradual;
- iv. uma tendência similar foi observada com os módulos de finura dos agregados na resistência da argamassa. Os maiores valores de resistência foram obtidos com módulos de finura variando entre 3 e 4.

FURNAS (1931) desenvolveu equações matemáticas com o objetivo de encontrar a granulometria capaz de fornecer a máxima densidade em concretos e argamassas. Segundo o autor, a composição das frações dos agregados utilizados na confecção de argamassas e concretos é um fator muito importante na determinação da trabalhabilidade da mistura e da densidade do produto final. De acordo com essa idéia, a determinação da quantidade de material presente nas frações de tamanhos sucessivos (decrecentes) depende principalmente dos vazios presentes na camada da fração mais grosseira do agregado. Uma grande quantidade de vazios demanda uma quantidade maior de material fino para preenchê-la.

A consideração dos vazios presentes na partícula mais grosseira do agregado levou o autor a dois tipos de solução granulométrica: uma para granulometrias intermitentes e outra para granulometrias contínuas. Teoricamente, a primeira solução proporciona a melhor compactidade. A segunda solução compõe um sistema com vantagens na trabalhabilidade, sendo que esta granulometria pode ser obtida usando materiais comerciais. Para a aplicação do princípio da granulometria contínua é necessária a separação das partículas do agregado em frações convenientes, pelo uso de uma série de peneiras, e depois definir a relação entre a quantidade de material retido em cada peneira utilizando a equação proposta pelo autor.

O tipo de curva granulométrica para máxima densidade, segundo FURNAS (1931) é determinado por dois fatores:

- i. a porcentagem de vazios presentes na camada mais grosseira do material avaliado, a qual depende da forma das partículas e
- ii. da razão entre os tamanhos limites (menor/maior) do sistema.

O autor considera que esta teoria desenvolvida poderá ser útil na correlação de dados experimentais e em prognóstico de misturas próprias para máxima densidade.

Experimentalmente os dois tipos de soluções granulométricas desenvolvidos por FURNAS (1931) foram avaliados por ANDEREGG (1931), que constatou que os agregados de granulometria contínua proporcionam os melhores resultados em argamassas, devido à extraordinária trabalhabilidade combinada com uma boa compactidade.

Neste estudo, resultados superiores foram obtidos com a utilização de grãos de areias mais arredondados. A maior angularidade dos grãos resultou um fator de empacotamento menor, maior demanda de água, baixas resistências à compressão, altos teores de absorção e baixa trabalhabilidade.



## ***4 Justificativas e relevância do tema***

---

### **4.1 JUSTIFICATIVAS DO ESTUDO**

“Partindo-se da premissa que a primeira forma de controle da poluição é a racionalização da exploração de recursos minerais, já que o carvão é o energético não renovável mais abundante no país, torna-se necessário um esforço para otimizar o seu uso e torná-lo compatível com a preservação do meio ambiente. Nesse cenário, as pesquisas de uso e controle ambiental para esse subproduto da queima do carvão assumem importância fundamental” (GOTHE, 1990).

Focando a indústria da construção civil, a racionalização, controle do desperdício, economia, competitividade, qualidade e desempenho, são termos que norteiam a nova ordem das construtoras. Mas estes termos sugerem várias ações a serem desenvolvidas para atingir-se a plenitude desta nova ordem. Ações que devem desenvolver-se em todas as etapas do processo construtivo.

Desta forma, as argamassas também devem ser objeto de investigações para que se possa estabelecer as ações necessárias ao seu desenvolvimento. Como a busca de qualidade passa a ser um dos objetivos dos construtores, não se justifica deixar as argamassas relegadas a segundo plano.

Por um outro lado, a construção civil e principalmente os materiais por ela empregados apresentam um amplo campo de reciclagem de resíduos provenientes de outros processos industriais. O estudo do emprego de materiais alternativos na construção civil pode, além de procurar solucionar problemas ambientais como destino final destes resíduos industriais, colaborar com respostas para os questionamentos existentes, trazendo novos conceitos de qualidade, propriedades e características dos materiais a serem empregados e ainda buscar uma nova fonte de matéria-prima.

A possibilidade de desenvolvimento de um novo material de revestimento, com controle de matérias-primas e melhoria de desempenho através do estabelecimento das

composições por curvas granulométricas, possibilita uma nova abordagem para a industrialização de argamassas compostas com matéria-prima secundária.

Neste contexto é que se propõe o estudo da utilização dos subprodutos da combustão do carvão mineral (cinzas pesadas) como agregado na produção de argamassas.

## **4.2 HIPÓTESES**

### *4.2.1 Hipótese geral*

As propriedades das argamassas, produzidas com as cinzas pesadas da queima do carvão, podem ser melhoradas através da otimização de sua incorporação com o emprego da distribuição granulométrica contínua.

### *4.2.2 Hipóteses subjacentes*

As argamassas produzidas com a incorporação das cinzas da combustão do carvão mineral possuem características e desempenho suficientes para assegurar o seu uso na construção civil.

### *4.2.3 Hipóteses de trabalho*

- ✓ A incorporação das cinzas pesadas em substituição à areia nas argamassas pode ser otimizada pela análise da composição granulométrica dos constituintes (aglomerante e agregado) através de curvas granulométricas;
- ✓ a distribuição granulométrica contínua, conforme modelo desenvolvido por FURNAS (1931), é uma das maneiras de se obter uma argamassa com a máxima compacidade, redução do consumo de aglomerante e da água de amassamento para uma trabalhabilidade desejada;
- ✓ as cinzas oriundas de diferentes processos termelétricos apresentam comportamento diferenciado quando usadas na composição de argamassas em substituição à areia;

- ✓ a cinza pesada possui características minerais satisfatórias.

### **4.3 OBJETIVOS**

#### *4.3.1 Objetivo geral*

Elaborar uma metodologia para a formulação de uma dosagem para argamassa de revestimento, através de curvas granulométricas, com a incorporação das cinzas provenientes da combustão do carvão pulverizado.

#### *4.3.2 Objetivos específicos*

- ✓ Investigar, de forma sistemática, a viabilidade de incorporação de cinzas pesadas da combustão do carvão pulverizado na dosagem de argamassas de revestimento através de curvas granulométricas;
- ✓ avaliar o comportamento das argamassas dosadas com a substituição da areia por cinzas pesadas;
- ✓ identificar as limitações da incorporação das cinzas como matéria-prima na dosagem de argamassas;
- ✓ verificar a influência das cinzas no comportamento das argamassas nos estados fresco e endurecido.

### **4.4 RESULTADOS ESPERADOS**

Como resultado geral espera-se formular uma argamassa de revestimento dosada com a adição de cinzas pesadas de carvão pulverizado, que tenha características de desempenho satisfatórias e semelhantes às dos produtos similares utilizados na construção civil.

#### **4.5 DELIMITAÇÕES DA PESQUISA**

Este estudo limitar-se-á às características dos lotes dos materiais utilizados (cimento, areia e cal), de forma especial às características das cinzas pesadas.

As cinzas apresentam características variáveis em função da composição do carvão, do grau de beneficiamento e moagem do carvão, tipo, projeto e operação da caldeira, e do sistema empregado para a extração e manuseio das cinzas (ROCHA et al, 1999).

Considerando esta variabilidade, os lotes de cinza empregados neste estudo serão caracterizados dentro dos parâmetros geométricos e estruturais, estabelecidos e investigados pelo Grupo ValoRes (grupo de pesquisa sobre a valorização de resíduos na construção civil) do Núcleo de Pesquisas da Construção – NPC, da Universidade Federal de Santa Catarina.

PARTE I – Introdução e dados de literatura

**PARTE II – Procedimento experimental**

PARTE III – Análise dos dados coletados

PARTE IV – Conclusões e Recomendações

PARTE V – Bibliografia e anexos

## 5 Materiais Utilizados

### 5.1 CIMENTO

Para a realização do estudo experimental foi utilizado o cimento Portland comum com adição de *filler* calcário, CP-II-F, classe 32, marca Itambé. Foi escolhido esse tipo de cimento pelo fato da única adição mineral presente ser o *filler* calcário, em teores de até 10% em massa. Desta forma, foi eliminada a possibilidade de interferência das adições com a reação pozolânica, das cinzas pesquisadas, que poderia ocorrer com a utilização de cimentos com adição de pozolanas (cinzas leves), que são fartamente encontrados na região sul do país. A caracterização do lote de cimento utilizado foi fornecida pelo fabricante, conforme apresentada na tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Laudo técnico do Cimento Portland CP-II-F Itambé (junho/2001).

ENSAIOS FISICOS	Unidade	Média	Desvio	Mínimo	Máximo
Peneira 200	%	2,69	0,28	2,20	2,90
Peneira 325	%	11,98	0,81	11,10	13,50
Blaine	m <sup>2</sup> /kg	3.213	19,09	3.190	3.240
Água de consistência normal	%	27,0	0,4	26,2	27,5
Início de pega	min	186	10,2	170	200
Fim de pega	min	248	8,9	235	255
Expansão à quente	mm	0,71	0,39	0,50	1,50
Resistência 1 dia	Mpa	14,8	0,8	13,3	15,6
Resistência 3 dias	Mpa	25,3	1,3	23,9	27,9
Resistência 7 dias	Mpa	30,5	0,9	29,7	32,0
Resistência 28 dias (mês anterior)	Mpa	0,00	0,00	0,00	0,00
Massa específica	g/cm <sup>3</sup>	3,09			

ENSAIOS QUÍMICOS	Unidade	Média	Desvio	Mínimo	Máximo
Perda ao Fogo	%	5,01	0,33	4,33	5,49
SiO <sub>2</sub>	%	18,28	0,19	18,03	18,57
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	4,20	0,08	4,09	4,28
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	2,38	0,05	2,33	2,45
CaO	%	60,46	0,24	60,06	60,70
MgO	%	4,94	0,08	4,83	5,06
CaO L.	%	1,52	0,25	1,15	1,88
SiO <sub>3</sub>	%	2,87	0,07	2,73	2,94
Resíduo insolúvel	%	1,24	0,22	0,88	1,45
Equação Alcalina	%	0,58	0,02	0,55	0,61

## 5.2 CAL

Um dos requisitos para a escolha da cal a ser utilizada no estudo experimental foi o credenciamento da marca junto ao Programa Setorial da Qualidade da Cal Hidratada para a Construção Civil, que faz parte do Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade do Habitat (PBQP-H). O objetivo deste programa é elaborar mecanismos específicos para garantir a conformidade com as Normas Brasileiras das cales hidratadas fornecidas aos usuários da construção civil, empregadas especificamente no preparo de argamassas mistas.

Desta forma, utilizou-se cal hidratada cálcica, classificada pela NBR 7175 (1992) como tipo CH-III, adquirida diretamente do produtor. A caracterização do lote adquirido foi fornecida pelo fabricante, conforme o laudo apresentado na tabela 5.2.

**Tabela 5.2 – Laudo técnico da Cal Hidratada CH III (Cal Gulin, junho/2001).**

ENSAIOS QUÍMICOS	Unidade	Valor
Perda ao Fogo (PF)	%	22,22
Resíduo insolúvel (RI)	%	5,39
Óxido de Cálcio (CaO)	%	42,98
Óxido de Magnésio (MgO)	%	27,74
Óxidos totais (CaO+ MgO)	%	70,72
Anidrido sulfúrico (SO <sub>2</sub> )	%	nd
Anidrido Carbônico (CO <sub>2</sub> )	%	2,86
Óxidos totais Não Hidratados	%	12,95
Óxidos de CaO Não Hidratados	%	nd
Massa específica	g/cm <sup>3</sup>	2,44
ENSAIOS FÍSICOS	Unidade	Valor
Granulometria # 30 (0,60 mm)	%	0,00
Granulometria # 200 (0,075 mm)	%	10,00

## 5.3 AGREGADOS

A composição granulométrica dos agregados utilizados nesta pesquisa obedeceu à curva granulométrica teórica obtida pelo modelo matemático proposto por FURNAS (1931), que será explicado detalhadamente no próximo capítulo. Este modelo sugere a utilização de uma granulometria contínua, visando a melhoria da trabalhabilidade e a obtenção de uma densidade máxima para argamassas e concretos.

Como já foi dito anteriormente, para a aplicação do princípio da granulometria contínua proposta, é necessária a separação dos grãos do agregado em frações convenientes, atreves da utilização de uma série de peneiras. Foram escolhidas as peneiras da série normal da NBR 5734 (1988) e o peneiramento foi realizado conforme procedimento descrito na norma NBR 7211 (1983). Após o peneiramento, os grãos dos agregados retidos nas peneiras de aberturas iguais a 1,20, 0,60, 0,30, 0,15, em milímetros, e fundo (< 0,15) foram armazenados separadamente em recipientes com tampa e capacidade volumétrica de 35 litros.

Os agregados utilizados foram compostos por areia (média e fina) e pelas cinzas pesadas provenientes dos dois processos termelétricos, Jorge Lacerda e Charqueadas. A caracterização destes materiais é apresentada a seguir.

### 5.3.1 Areia

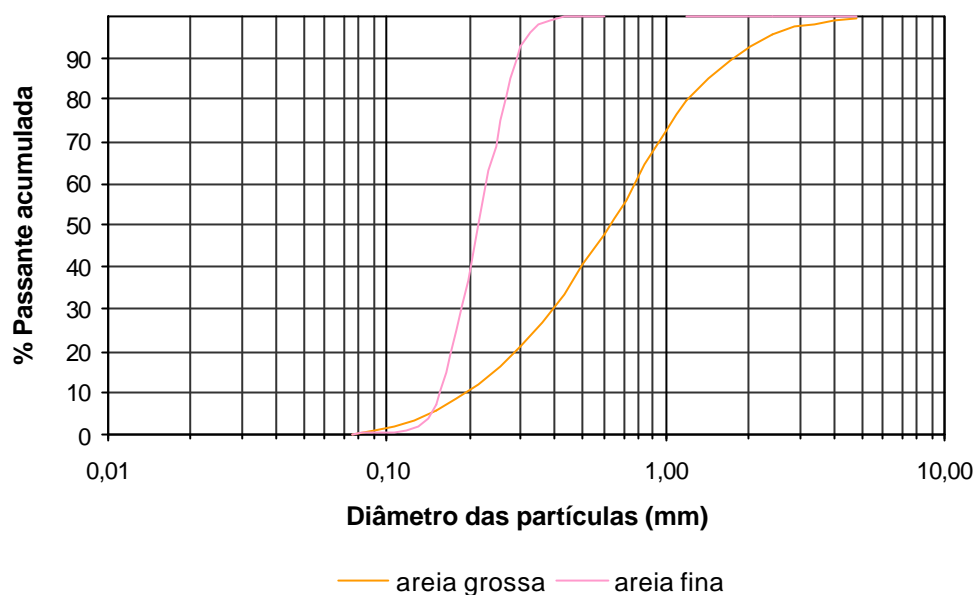
Para atender as granulometrias desejadas no estudo experimental, foram utilizadas, duas areias de granulometria e módulo de finura diferentes, ambas provenientes do município de Palhoça, localidade de Sertão do Campo (SC).

Estas areias foram submetidas aos ensaios de granulometria – NBR 7211 (1983) e material pulverulento – NBR 7216 (1983), após secagem em estufa por, no mínimo, 24 horas, à temperatura de  $105 \pm 5^\circ\text{C}$  e resfriamento à temperatura ambiente. Os resultados destes ensaios são apresentados na tabela 5.3 e na figura 5.1.

**Tabela 5.3 – Análise granulométrica das areias.**

GRANULOMETRIA AREIA GROSSA					GRANULOMETRIA AREIA FINA				
Peneira #	massa retida (g)	% retida	% retida acumulada	% passante acumulada	Peneira #	massa retida (g)	% retida	% retida acumulada	% passante acumulada
4,80	2,82	0,57	0,57	99,43	4,80	0,00	0,00	0,00	100,00
2,40	18,73	3,76	4,33	95,67	2,40	0,00	0,00	0,00	100,00
1,20	78,67	15,80	20,12	79,88	1,20	0,00	0,00	0,00	100,00
0,60	160,29	32,19	52,31	47,69	0,60	0,20	0,02	0,02	99,98
0,30	131,49	26,41	78,72	21,28	0,30	81,00	7,09	7,11	92,89
0,15	78,03	15,67	94,39	5,61	0,15	977,20	85,54	92,65	7,35
fundo	27,95	5,61	100,00	0,00	fundo	84,00	7,35	100,00	0,00
Soma	497,96	100,00	-	-	Soma	1142,40	100,00	-	-
Diâmetro Máximo Característico				2,40	Diâmetro Máximo Característico				0,60
Diâmetro Mínimo Característico				< 0,15	Diâmetro Mínimo Característico				< 0,15
Módulo de Finura				2,50	Módulo de Finura				1,00
Material Pulverulento				0,52%	Material Pulverulento				0,79%





**Figura 5.1 – Curva Granulométrica das areias grossa e fina.**

Antes da separação granulométrica, as areias foram secas em estufa à temperatura de  $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$  por período superior a 24 horas e resfriadas à temperatura ambiente. Após o peneiramento, tanto os grãos da areia grossa quanto os da areia fina, pertencentes à mesma fração, foram armazenados conjuntamente. Com cada fração foram realizados ensaios para a determinação da massa unitária e da massa específica.

As massas unitárias foram determinadas segundo um procedimento adaptado da NBR 7810 (1983), Agregado em estado compactado seco - Determinação da massa unitária, por LENZI (2001) conforme descrito abaixo:

- i. a areia é lançada de uma altura de 10cm, dentro de um recipiente cúbico de aço (5mm de espessura), medindo 15cm de aresta, com capacidade volumétrica de  $3,375\text{dm}^3$ ;
- ii. o volume é completado, sem fazer a rasadura, e a areia é adensada, colocando-se o recipiente cúbico sobre a mesa de queda livre (*flow table*), descrita na NBR 7215, mediante dez golpes em 10 segundos;
- iii. completa-se novamente o volume, sem rasar, submetendo o recipiente a mais cinco golpes na mesa de queda livre, em 5 segundos;

- iv. mais uma vez o volume é completado, faz-se a rasadura do topo do recipiente com uma régua metálica, formando 90° com a superfície da areia em movimentos de vai e vem;
- v. é feita a leitura da massa de areia contida no recipiente em balança com precisão de 0,1 grama;
- vi. dividindo a massa da areia pela capacidade volumétrica do recipiente, encontra-se a massa unitária.

A massa específica aparente de cada fração foi determinada pelo processo do picnômetro, utilizando frascos com 250ml de volume. Os resultados de ambos ensaios são apresentados na tabela 5.4.

**Tabela 5.4 – Massa unitária e massa específica das frações de areia.**

<b>FRAÇÃO (mm)</b>	<b>Massa Unitária (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Massa Específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>
1,20	1,440	2,727
0,60	1,434	2,500
0,30	1,366	2,727
0,15	1,330	2,727
< 0,15	1,321	2,500

A escolha do maior diâmetro utilizado (1,20mm) deve-se ao fato deste ser um tamanho de grão facilmente encontrado, em quantidades abundantes, em areias naturais utilizadas na dosagem de argamassas.

### **5.3.2 Cinzas pesadas**

A proposta deste trabalho é analisar o comportamento das argamassas dosadas com cinzas provenientes de dois processos termelétricos, o do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda, localizado no município de Capivari de Baixo em Santa Catarina, e da Usina Termelétrica de Charqueadas, localizada no município de Charqueadas no Rio Grande do Sul.

As cinzas pesadas foram coletadas nas bacias de decantação das termelétricas e armazenadas, ainda úmidas, em recipientes plásticos com tampa e capacidade volumétrica de 200 litros, como pode ser visto nas figuras 5.2, 5.3 e 5.4.



**Figura 5.2 – Retirada das cinzas pesadas na bacia – Complexo Jorge Lacerda.**



**Figura 5.3 – Retirada das cinzas pesadas na bacia – Usina Termelétrica Charquedas.**



**Figura 5.4 – Armazenagem das cinzas pesadas em recipientes plásticos.**

Os lotes das cinzas pesadas foram caracterizados quimicamente através dos parâmetros, de determinação dos elementos constituintes, estabelecidos pelo Grupo ValoRes (grupo de pesquisa sobre a valorização de resíduos na construção civil) do Núcleo de Pesquisas da Construção – NPC, da Universidade Federal de Santa Catarina. A composição química das cinzas é apresentada na tabela 5.5.

**Tabela 5.5 – Composição química das cinzas pesadas utilizadas no estudo experimental.**

<b>Elementos Constituintes</b>	<b>Cinzas pesadas (%)</b>	
	<b>Charqueadas</b>	<b>Jorge Lacerda</b>
SiO <sub>2</sub>	51,71	56,82
AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22,71	26,62
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,93	6,59
MnO	0,04	0,03
MgO	0,46	0,66
CaO	2,75	1,12
Na <sub>2</sub> O	0,09	0,29
K <sub>2</sub> O	0,94	2,65
TiO <sub>2</sub>	0,86	1,28
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,08	0,10
Perda ao fogo	14,35	3,82
C orgânico	10,74	3,48
CO <sub>2</sub> total	40,09	13,16
S	0,65	0,10
Cl (ppm)	1030	260

A exemplo das areias e pelos mesmos processos, as cinzas foram totalmente secas em estufa, até constância de massa, e caracterizadas quanto à sua granulometria por peneiramento a seco, separadas em frações para as quais foram determinadas as massas unitária e específica aparente. As frações de cada tipo de cinza (Charqueadas ou Jorge Lacerda) foram armazenadas separadamente em recipientes com tampa e capacidade volumétrica de 35 litros.

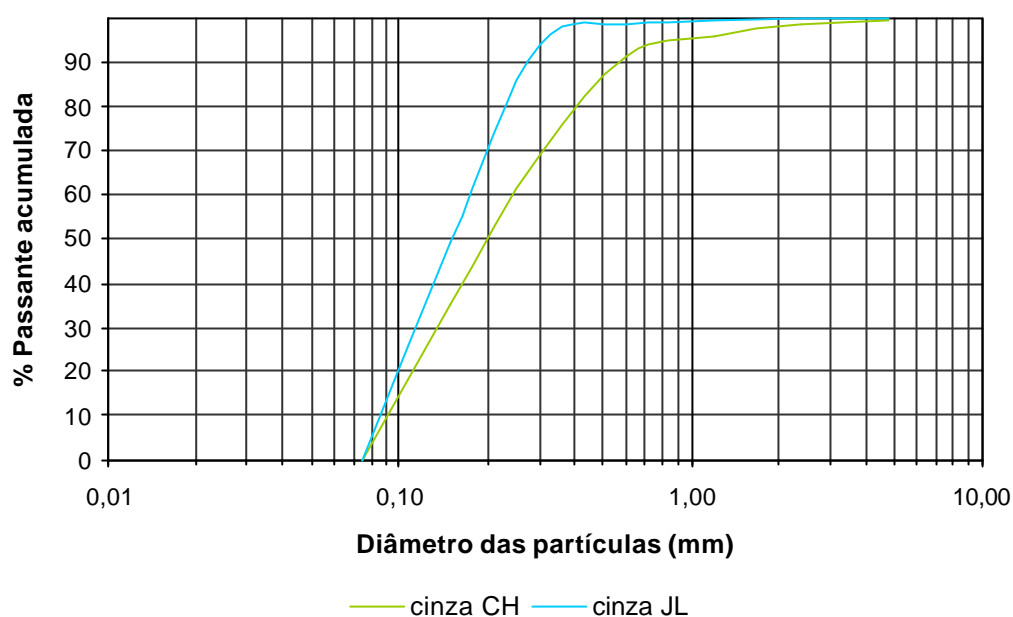
As cinzas provenientes da Usina Termelétrica de Charqueadas, doravante chamadas apenas de “CH”, levam mais de 48 horas na estufa à temperatura de  $105 \pm 5^\circ\text{C}$  para ficarem completamente secas. Apresentam coloração cinza escura e granulometria mais grosseira em comparação às cinzas provenientes do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda.

As cinzas provenientes do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda, doravante chamadas apenas de “JL”, levam mais de 72 horas na estufa à temperatura de  $105 \pm 5^\circ\text{C}$  para ficarem completamente secas. Apresentam coloração cinza clara e granulometria mais fina em comparação às cinzas Charqueadas.

Os resultados dos ensaios de caracterização das cinzas Charqueadas e Jorge Lacerda são apresentados a seguir.

**Tabela 5.6 – Análise granulométrica das cinzas Charqueadas e Jorge Lacerda.**

GRANULOMETRIA CINZAS CH					GRANULOMETRIA CINZAS JL				
Peneira #	massa retida (g)	% retida	% retida acumulada	% passante acumulada	Peneira #	massa retida (g)	% retida	% retida acumulada	% passante acumulada
4,80	4,60	0,43	0,43	99,57	4,80	0,00	0,00	0,00	100,00
2,40	13,60	1,26	1,68	98,32	2,40	1,21	0,12	0,12	99,88
1,20	25,60	2,37	4,05	95,95	1,20	4,20	0,40	0,52	99,48
0,60	47,10	4,36	8,41	91,59	0,60	10,18	0,98	1,50	98,50
0,30	239,80	22,19	30,60	69,40	0,30	49,04	4,71	6,21	93,79
0,15	370,20	34,25	64,85	35,15	0,15	468,27	45,00	51,22	48,78
fundo	379,90	35,15	100,00	0,00	fundo	507,60	48,78	100,00	0,00
Soma	1080,80	100,00	-	-	Soma	1040,50	100,00	-	-
Diâmetro Máximo Característico				1,20	Diâmetro Máximo Característico				0,60
Diâmetro Mínimo Característico				< 0,15	Diâmetro Mínimo Característico				< 0,15
Módulo de Finura				1,10	Módulo de Finura				0,60
Material Pulverulento				-	Material Pulverulento				-



**Figura 5.5 – Curva Granulométrica das cinzas Charqueadas e Jorge Lacerda.**

Assim como as areias, os grãos de cinzas também foram separados em frações granulométricas para atender às especificações da metodologia proposta por FURNAS (1931). As massas específicas e unitárias foram obtidas pelos mesmos processos utilizados na caracterização das areias.

**Tabela 5.7 – Massa unitária e massa específica das cinzas Charqueadas e Jorge Lacerda.**

FRAÇÃO (mm)	Cinzas Charqueadas		Cinzas Jorge Lacerda	
	Massa Unitária (g/cm <sup>3</sup> )	Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	Massa Unitária (g/cm <sup>3</sup> )	Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )
1,20	-	-	-	-
0,60	0,631	2,068	-	-
0,30	0,681	2,233	0,607	1,559
0,15	0,708	2,145	0,815	1,749
< 0,15	0,667	2,263	0,939	1,804

Nenhuma das cinzas apresentaram quantidade suficiente de grãos para serem utilizados na fração 1,20mm, e a cinza JL também apresentou ausência de partículas na fração 0,60mm.

Para obter uma caracterização dos grãos das frações de cinzas, foram feitas as determinações, por adsorção de nitrogênio (IPEN – Instituto de Pesquisa em Energia

Nuclear, São Paulo), da área de superfície específica, apresentadas na tabela 5.8, e imagens feitas através da microscopia de varredura eletrônica – MEV (figuras 5.6 e 5.7, apresentadas nas páginas seguintes).

**Tabela 5.8 – Área de superfície específica das cinzas Charqueadas e Jorge Lacerda.**

Fração (mm)	Área Específica (m <sup>2</sup> /g)	
	cinzas CH	cinzas JL
< 0,15	14,53	5,00
0,15	17,92	1,36
0,30	12,85	1,14
0,60	48,13	-

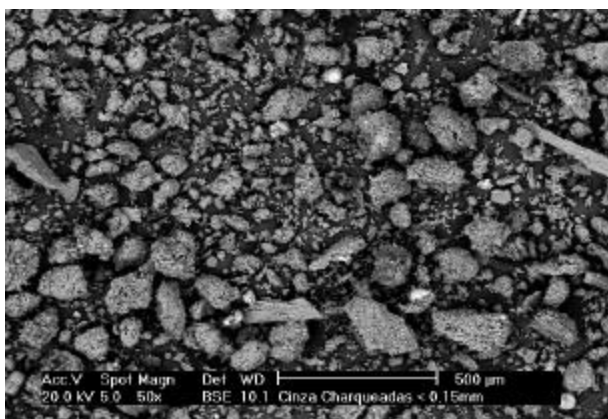
As cinzas Charqueadas apresentam, em todas as frações, valores de área de superfície específica bem maiores comparados aos das cinzas Jorge Lacerda. Ao observar as micrografias dos grãos, principalmente a da fração 0,30mm com ampliação de 200 vezes do tamanho original (figura 6.7), percebe-se que as cinzas Charqueadas apresentam uma superfície mais rugosa e porosa que a dos grãos de cinzas Jorge Lacerda, justificando os altos valores de área de superfície específica.

Observa-se também, através das micrografias, que as cinzas Jorge Lacerda apresentam muitos grãos com formato esférico. Já as cinzas Charqueadas apresentam, em sua maioria, grãos com formatos bastante irregulares.

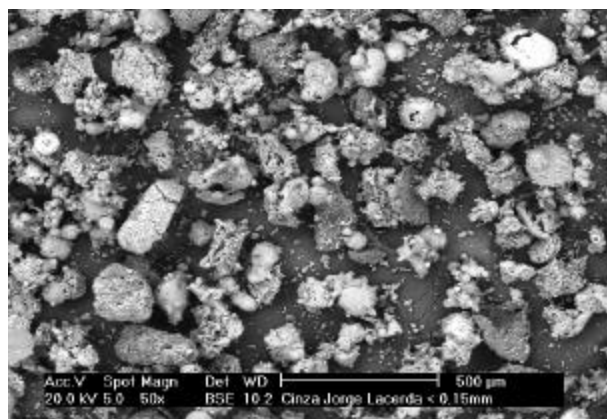
A determinação dessas características físicas das cinzas é de fundamental importância, pois como essas cinzas vão substituir a areia para compor o agregado utilizado na confecção das argamassas a serem investigadas, essas características poderão ser o fator determinante na avaliação das propriedades das argamassas no estado fresco e endurecido.

## 5.4 ÁGUA

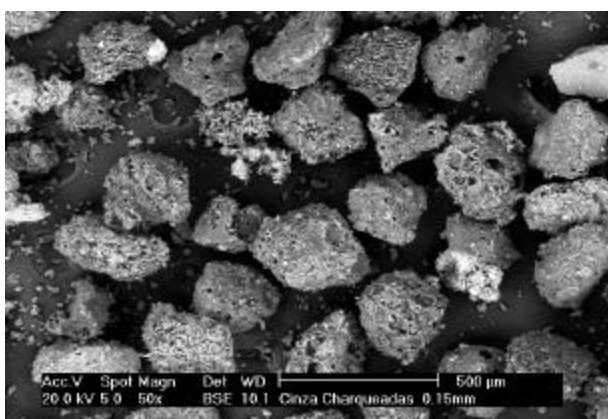
Para a produção das argamassas foi utilizada água da rede pública local, fornecida pela CASAN (SC).



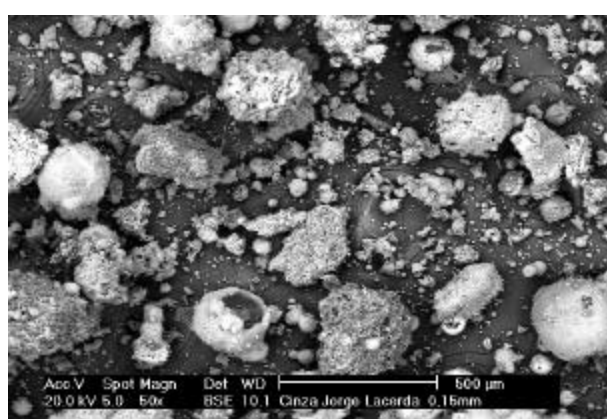
Cinzas Charqueadas < 0,15mm



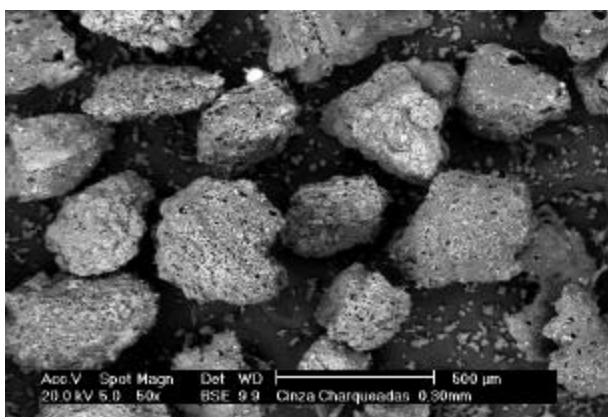
Cinzas Jorge Lacerda < 0,15mm



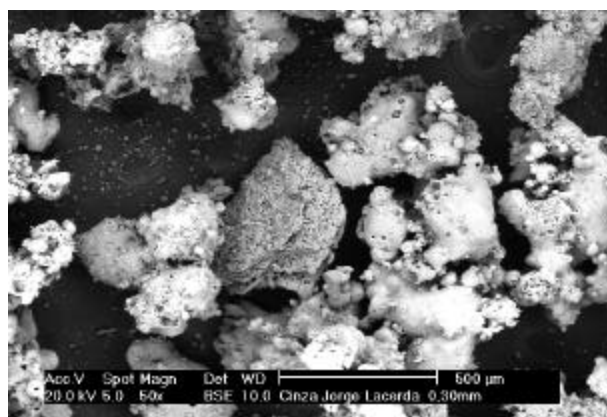
Cinzas Charqueadas 0,15mm



Cinzas Jorge Lacerda 0,15mm



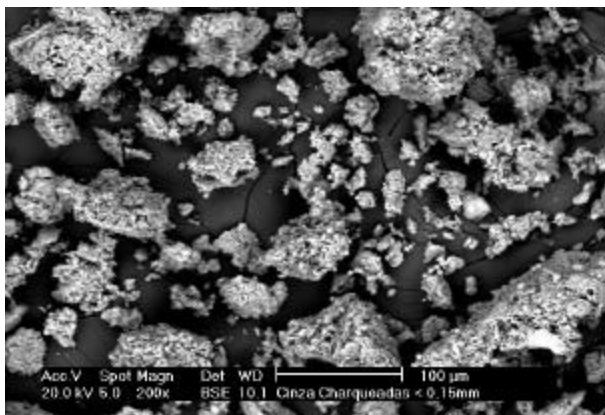
Cinzas Charqueadas 0,30mm



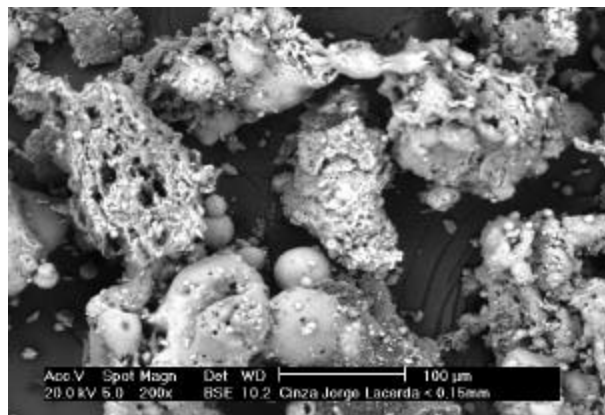
Cinzas Jorge Lacerda 0,30mm

**Figura 5.6 - Micrografia MEV das frações de cinzas (ampliação de 50 vezes).**

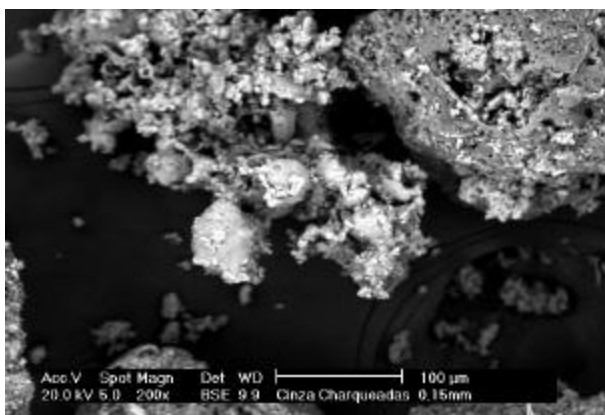




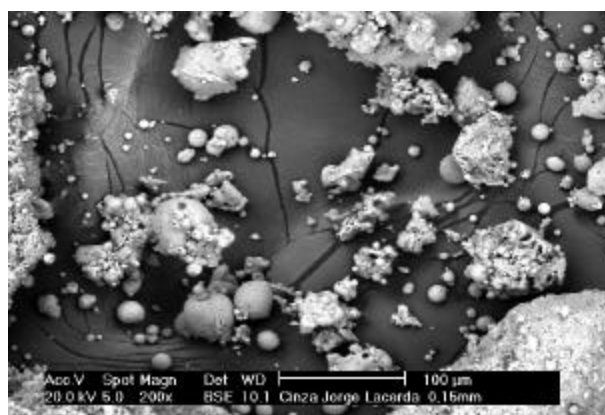
Cinzas Charqueadas < 0,15mm



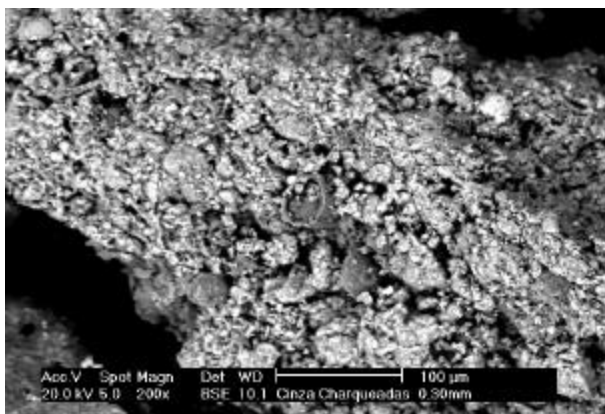
Cinzas Jorge Lacerda < 0,15mm



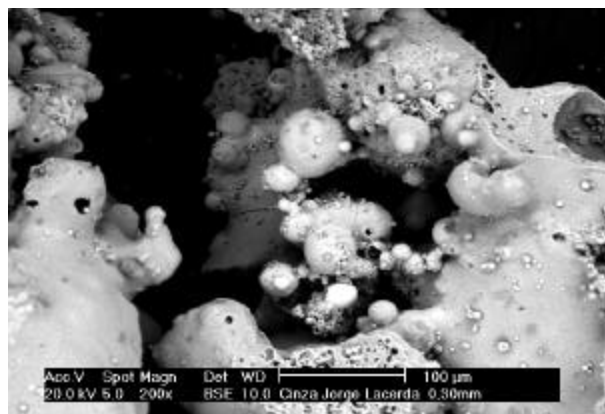
Cinzas Charqueadas 0,15mm



Cinzas Jorge Lacerda 0,15mm



Cinzas Charqueadas 0,30mm



Cinzas Jorge Lacerda 0,30mm

**Figura 5.7 – Micrografia MEV das frações de cinzas (ampliação de 200 vezes).**

## 6 Metodologia

---

O princípio para a composição e dosagem de uma argamassa com base na curva granulométrica consiste em obter uma argamassa trabalhável no estado fresco e que possua, no estado endurecido, uma compacidade elevada, com redução do volume de vazios e com capacidade de deformação.

### 6.1 METODOLOGIA DE COMPOSIÇÃO DA CURVA GRANULOMÉTRICA

Para gerar a curva granulométrica teórica foi adotada a equação do somatório de uma progressão geométrica proposta por FURNAS (1931), equação 6.1.

$$S_m = A (1 - Pr^m) / (1 - Pr) \quad \text{Equação 6.1}$$

Sendo:

- ✓ **A** o primeiro termo do somatório, correspondente à quantidade de material retido na abertura máxima, logo abaixo da peneira de abertura máxima característica;
- ✓ **Pr** é a razão entre as quantidades retidas em cada peneira. O valor de **Pr** nunca poderá ser igual a 1. Segundo CARNEIRO (1999), quanto mais próximo de 1 for o valor de **Pr**, maior será a compacidade na argamassa e a continuidade no perfil da curva granulométrica. No entanto, segundo o mesmo autor, o aumento da continuidade poderá diminuir a trabalhabilidade em função do enrijecimento da mistura. Como o presente estudo refere-se a argamassas de revestimento, a trabalhabilidade é uma propriedade importante.
- ✓ **m** é o número de termos, ou de constituintes da progressão geométrica. Neste trabalho será considerada cada fração granulométrica dos aglomerantes e do agregado como um constituinte da curva granulométrica.

O primeiro termo do somatório é calculado a partir da equação 6.1, admitindo-se  $S_m = 100$ ; logo, substituindo-se este termo na equação 6.1, tem-se a equação 6.2:

$$A = 100 (1 - P_r) / (1 - P_r^m) \quad \text{Equação 6.2}$$

Por definição, os próximos termos da série geométrica, correspondentes aos valores de percentagem de material retido nas peneiras subseqüentes, são obtidos através da equação 6.3:

$$A_{m+1} = A_m \times P_r, \text{ com } P_r < 1 \quad \text{Equação 6.3}$$

## 6.2 PROCEDIMENTO PARA GERAR A CURVA GRANULOMÉTRICA

Neste item procura-se descrever todos os passos necessários para gerar a curva granulométrica das argamassas compostas neste trabalho. Para a composição da curva granulométrica, serão necessárias as determinações dos seguintes parâmetros:

### 6.2.1 Determinação do número de termos $m$

Para a determinação do número de termos constituintes da progressão geométrica, é necessário definir:

- ✓ o diâmetro máximo característico da areia a ser utilizada, pois, através deste parâmetro, será definida a abertura máxima característica da peneira;
- ✓ o diâmetro mínimo do aglomerante, pois dele depende o número dos constituintes da progressão geométrica.

Será utilizada, na realização do presente estudo, a série normal de peneiras da NBR 7211 (1983), cuja razão de abertura entre as malhas é igual a 2. Adotou-se o diâmetro máximo característico igual a 2,40mm, que representa uma areia de tamanho médio empregada em argamassas. O valor do menor diâmetro considerado foi de 0,001mm, pois este é o valor limite mínimo mensurável na granulometria a laser dos aglomerantes segundo dados de literatura (CARNEIRO, 1999).

Desta forma, tomando o diâmetro máximo característico (2,40mm) e dividindo este valor por 2, que é a razão entre as malhas das peneiras escolhidas, sucessivamente até chegar ao valor do menor diâmetro característico (0,001mm) tem-se o número de termos constituintes da progressão geométrica – tabela 6.1.

**Tabela 6.1 – Número de termos (m) da progressão geométrica.**

<b>f peneira teórica (mm)</b>	<b>m</b>
2,400	0
1,200	1
0,600	2
0,300	3
0,150	4
0,075	5
0,038	6
0,019	7
0,009	8
0,005	9
0,002	10
0,001	11

Cabe esclarecer, neste momento, que o valor de **m** representa o número de telas, com a razão entre as malhas igual a 2, do intervalo que inclui os tamanhos limites do sistema, ou seja, um número a menos do que o número de telas usadas (FURNAS, 1931).

Na verdade, FURNAS (1931) sugere a utilização de peneiras com a razão entre as malhas igual a 2, o que configura a série principal de peneiras descrita na NBR 5734 (1988). Mas como o presente trabalho não tem por objetivo fazer uma análise aprofundada a respeito do formato e dimensões dos grãos utilizados como agregado, e sim avaliar o desempenho de argamassas dosadas, com adições de cinzas pesadas, a partir de uma curva granulométrica contínua, foi feita a escolha da série normal de peneiras (NBR 7211/1983).

### **6.2.2 Determinação da razão *Pr* entre as quantidades retidas em cada peneira**

Segundo FURNAS (1931), para um máximo empacotamento em um sistema de muitos tamanhos componentes, a proporção entre o diâmetro das partículas de tamanhos sucessivos tem que ser constante para todo o sistema. Na presente pesquisa, tal

proporção é designada pela letra *r*. Sendo *r* a quantidade de partículas grandes dividida pela quantidade de partículas pequenas, ou seja, *r* é a proporção da quantidade de partículas que ficam retidas em duas telas consecutivas.

Ressalta-se que esta quantidade se refere ao volume absoluto de partículas, cujas medidas em peso são válidas desde que a densidade real seja constante para todas as frações. O caso de densidades variáveis pode ser resolvido pela determinação do volume da base (fração mais grosseira), e os pesos relativos sendo determinados pela multiplicação das proporções em volume pela massa específica.

Para a determinação do valor de *r* foi empregada a equação 6.4, também proposta por FURNAS (1931),

$$r = 1/(V^{n/m}) \quad \text{Equação 6.4}$$

onde:

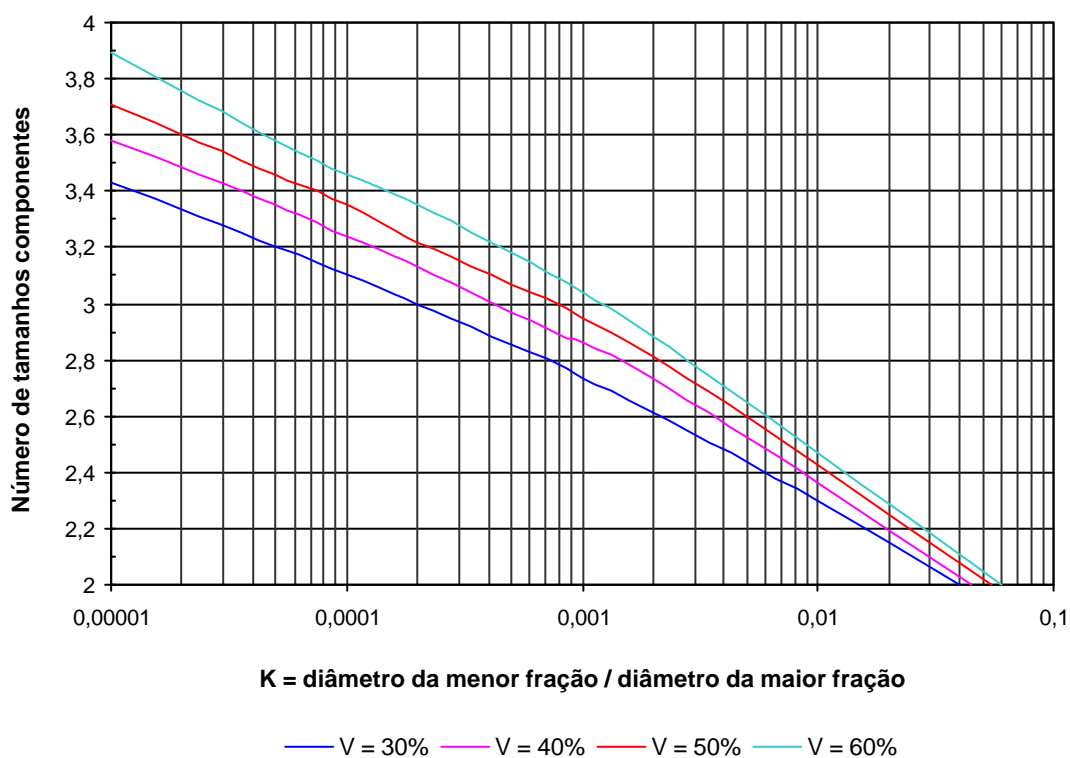
- ✓ **V** é o volume de vazios em uma unidade do volume total da camada mais grosseira. Para encontrar o valor de V basta solucionar a equação  $(1 - MU/ME)$  em que MU é a massa unitária e ME a massa específica aparente, ambas em g/cm<sup>3</sup>, da fração de maior diâmetro a ser utilizada (tabela 6.2);
- ✓ **n** representa o número total de tamanhos componentes menos um, para máxima densidade em granulometrias contínuas (um a menos que a ordenada da figura 6.1). O ábaco apresentado nesta figura foi retirado do artigo de FURNAS (1931) que desenvolveu a metodologia aqui adotada para dosagem de concretos. Por esta razão, o valor do número total de componentes varia somente de 2 a 4 componentes.
- ✓ **m** é o número de peneiras da série com a razão entre as aberturas das malhas igual a 2, cujo intervalo é delimitado pelas peneiras com abertura de malha igual aos tamanhos limites do sistema (maior e menor diâmetro dos compomenetes), ou seja, um número a menos do que o número total de peneiras usadas (ver tabela 6.1).

**Tabela 6.2 – Determinação do volume de vazios V.**

Dmáx (mm)	MU (g/cm <sup>3</sup> )	ME (g/cm <sup>3</sup> )	V %
1,20	1,44	2,73	47,19

Os valores acima representam as determinações realizadas na caracterização da fração mais grosseira presente no agregado utilizado, ou seja, a fração de areia retida na peneira 1,20mm.

Para determinar o valor de **n** é preciso calcular o valor de **K**, que é a razão entre o diâmetro da menor fração (0,001mm) e o diâmetro da maior fração (1,20mm). Com o valor de **K = 0,0008** e o valor da porcentagem de vazios **V = 47,19%** presentes na fração mais grosseira do agregado, pode-se determinar o valor de **n** através do ábaco apresentado na figura 6.1, ressaltando que **n** é o valor dado pela ordenada do ábaco menos uma unidade.



**Figura 6.1– Relação entre a proporção de diâmetros e o número de componentes para um sistema de máxima densidade (FURNAS, 1931).**

Obtendo-se o valor de **r** (equação 6.4), basta substituí-lo na equação 6.5 para se obter o valor de **Pr**, que é a razão entre as quantidades retidas em cada peneira.

$$Pr = 1/r$$

**Equação 6.5**

A determinação do valor **Pr** é feita somente para que se possa organizar a progressão geométrica de forma decrescente, ou seja, para determinar a razão da quantidade de material retida em cada peneira a partir do maior diâmetro.

Todos os parâmetros necessários para a composição da curva granulométrica teórica, determinados neste item, estão apresentados na tabela 6.3.

**Tabela 6.3 – Parâmetros determinados para a composição da curva granulométrica.**

D <sub>máx</sub> (mm)	D <sub>mín</sub> (mm)	Vazios (%)	K	m	n	r	Pr
1,20	0,001	47,19	0,0008	11	2	1,15	0,87

A partir dos parâmetros determinados acima foi então composta a curva granulométrica teórica. De forma resumida, pode-se dizer que a determinação da curva granulométrica teórica depende dos diâmetros da maior e da menor partícula do sistema e da definição da série de peneiras adotada.

ANDEREGG (1931) cita que os melhores resultados para resistência à compressão e à flexão, retração, resistência à abrasão e permeabilidade são obtidas com uma granulometria do agregado onde os valores de *r* estão entre 1,11 e 1,18. As melhores resistências a ataques químicos são obtidas pelas granulometrias nas quais o valor de *r* é próximo de 1,00.

### 6.3 CURVA GRANULOMÉTRICA TEÓRICA

Após a determinação de todos os parâmetros necessários e a resolução das equações, foi desenvolvida a curva granulométrica teórica para a dosagem das argamassas a serem pesquisadas.

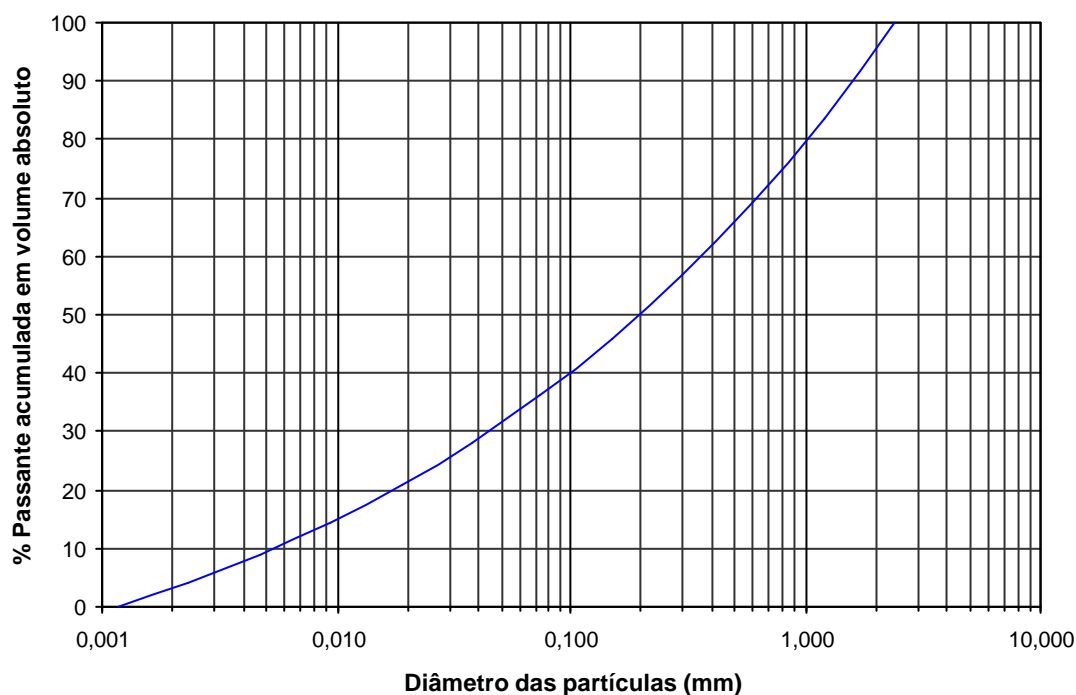
O primeiro termo da progressão geométrica (equação 6.2) indica a quantidade de material retido na peneira com abertura correspondente ao maior diâmetro utilizado (1,20mm). A quantidade de material retido nas peneiras subseqüentes é obtida pelo produto da quantidade retida na peneira imediatamente superior pela razão **Pr = 0,87** (equação 6.3).

A tabela 6.4 apresenta os dados da granulometria, lembrando que estes dados referem-se ao volume absoluto das partículas. Para a composição dos traços das argamassas os valores de volume foram convertidos através da massa específica

aparente de cada fração ou material constituinte. A curva granulométrica teórica é apresentada na figura 6.2.

**Tabela 6.4 – Valores calculados para a curva granulométrica teórica.**

<b>f peneira teórica (mm)</b>	<b>% retida em volume absoluto</b>	<b>% retida acumulada em volume</b>	<b>% passante acumulada em volume</b>
2,400	0,00	0,00	100,00
1,200	16,42	16,42	83,58
0,600	14,32	30,74	69,26
0,300	12,50	43,24	56,76
0,150	10,90	54,14	45,86
0,075	9,51	63,65	36,35
0,038	8,30	71,94	28,06
0,019	7,24	79,18	20,82
0,009	6,31	85,49	14,51
0,005	5,51	91,00	9,00
0,002	4,81	95,81	4,19
0,001	4,19	100,00	0,00



**Figura 6.2 – Representação gráfica da curva granulométrica teórica.**

A aplicação lógica do princípio da granulometria contínua inclui, de forma conjunta, a granulometria dos agregados e dos aglomerantes. O objetivo desse raciocínio é o da utilização de partículas finas do agregado em quantidades suficientes para



suavizar a curva granulométrica, preservando sua continuidade, entre os menores diâmetros das partículas dos aglomerantes até os maiores diâmetros dos grãos dos agregados.

Segundo ANDEREGG (1931), que testou experimentalmente a metodologia proposta por FURNAS (1931), a aplicação da curva teórica de granulometria contínua proporcionou bons resultados em argamassas, incluindo boa trabalhabilidade, baixa demanda de água, ótima compacidade aliada a alta resistência mecânica, baixa absorção e baixa retração.

O objetivo do estudo de FURNAS (1931) foi estabelecer equações para serem utilizadas em argamassas e concretos, mas, segundo o autor, pode ser demonstrado que as equações estabelecidas também podem ser utilizadas em outros sistemas em que partículas sólidas estejam envolvidas. Dentre estes sistemas pode-se citar o concreto asfáltico, tintas, massa de vidraceiro, borracha e massas catalisadoras, entre outros.

## **6.4 DETERMINAÇÃO DAS COMPOSIÇÕES DAS ARGAMASSAS**

### ***6.4.1 Traço em volume***

Foi definido que os traços em volume seguiriam a proporção normalmente utilizada em obras para argamassas mistas de revestimento, ou seja, 1: 2: 9 (cimento: cal: agregado). Desta forma haverá parâmetros de comparação do desempenho das argamassas produzidas neste trabalho com dados de literatura.

A partir da definição anterior, tem-se que 25% do volume total das partículas secas é composto pelos aglomerantes, sendo um terço desse valor (8,33%) a quantidade de cimento e dois terços (16,67%) a quantidade de cal. Os agregados compõem os 75% restantes do volume retido.

Considerou-se que as partículas de aglomerantes (cimento e cal) possuem diâmetros inferiores a 0,15mm. É necessário esclarecer que os diâmetros menores que 0,15mm, tanto dos agregados quanto dos aglomerantes, não foram separados em frações por motivos práticos. Desta forma, para compor o traço em volume das argamassas, foi seguido o seguinte procedimento:

- 1) Os valores da porcentagem de volume retido (tabela 6.4) foram arredondados para valores inteiros e os valores retidos nas peneiras para diâmetros **inferiores** a 0,15mm foram acumulados, conforme mostra a tabela 6.5.

**Tabela 6.5 – Quantidade de volume absoluto retido para cada diâmetro.**

Fração	2,40	1,20	0,60	0,30	0,15	< 0,15
% volume retido	0	16	14	12	11	46

- 2) Observando os valores apresentados na tabela 6.5 tem-se que 54% do volume total de material definido na curva teórica fica retido na peneira de 0,15mm. Essa quantidade de material é composta apenas por agregados. Desta forma, a porcentagem de agregado passante por essa peneira será a quantidade que falta para completar os 75% de volume dos agregados, ou seja, 21% - tabela 6.6.

**Tabela 6.6 – Resumo do traço em % de volume retido.**

Fração (mm)	% de volume retido		
	Cimento	Cal	Agregado
> 0,150	-	-	54
< 0,150	8	17	21

A partir da definição do traço em volume para as argamassas, foram feitos os estudos para a incorporação das cinzas pesadas.

#### **6.4.2 Incorporação das cinzas pesadas**

As cinzas pesadas, tanto as cinzas Charqueadas quanto às cinzas Jorge Lacerda, foram incorporadas nas argamassas através da substituição, em volume, da areia. Foram feitas substituições de 0%, 50% e 100% dos grãos de areia, o que deu origem a cinco traços distintos para as argamassas. Essas argamassas receberam a seguinte denominação:

- 1) **REF 0%:** argamassa de referência constituída por cimento, cal e areia, com 0% de substituição da areia pela cinza pesada.

- 2) **CH 50%:** argamassa constituída por cimento, cal, areia e cinzas Charqueadas em substituição a 50% do volume de areia nas frações 0,60, 0,30 e 0,15mm. As partículas de agregado passantes na malha 0,15mm utilizadas nessa argamassa são constituídas apenas por cinzas.
- 3) **CH 100%:** argamassa constituída por cimento, cal, areia e cinzas Charqueadas em substituição a 100% do volume de areia nas frações 0,60, 0,30 e 0,15mm. As partículas de agregado passantes na malha 0,15mm utilizadas nessa argamassa são constituídas apenas por cinzas.
- 4) **JL 50%:** argamassa constituída por cimento, cal, areia e cinzas Jorge Lacerda em substituição a 50% do volume de areia nas frações 0,30 e 0,15mm. Pelo fato dessas cinzas não apresentarem quantidade suficiente de grãos retidos na malha 0,60mm, não foi possível a substituição da areia nessa fração. As partículas de agregado passantes na malha 0,15mm utilizadas nessa argamassa são constituídas apenas por cinzas.
- 5) **JL 100%:** argamassa constituída por cimento, cal, areia e cinzas Jorge Lacerda em substituição a 100% do volume de areia nas frações 0,30 e 0,15mm. Pelo fato dessas cinzas não apresentarem quantidade suficiente de grãos retidos na malha 0,60mm, não foi possível a substituição da areia nessa fração. As partículas de agregado passantes na malha 0,15mm utilizadas nessa argamassa são constituídas apenas por cinzas.

Em nenhuma das argamassas foi feita a substituição dos grãos de areia retidos na malha 1,20mm, pois nenhuma das cinzas pesadas utilizadas possuíam esta fração granulométrica em quantidade satisfatória.

#### 6.4.3 Traços em massa

Como foi dito anteriormente, a curva granulométrica teórica é calculada para valores em volume absoluto de partículas. Para a realização da dosagem em massas das argamassas, todos os valores de volume absoluto devem ser convertidos utilizando-se valores de massa específica. Essas conversões são apresentadas nas tabelas 6.7 a 6.11.

**Tabela 6.7 – Conversões em massa para o traço da argamassa REF 0%.**

Fração	% volume	AREIA			CINZA			CIMENTO			CAL		
		% volume	ME (g/cm <sup>3</sup> )	% massa	% volume	ME (g/cm <sup>3</sup> )	% massa	% volume	ME (g/cm <sup>3</sup> )	% massa	% volume	ME (g/cm <sup>3</sup> )	% massa
2,400	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1,200	16	16	2,727	45	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,600	14	14	2,500	36	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,300	12	12	2,727	34	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,150	11	11	2,727	30	-	-	-	-	-	-	-	-	-
< 0,150	46	21	2,500	52	-	-	-	8	3,1	26	17	2,4	41

**Tabela 6.8 – Conversões em massa para o traço da argamassa CH 50%.**

Fração	% volume	AREIA			CINZA			CIMENTO			CAL		
		% volume	ME (g/cm <sup>3</sup> )	% massa	% volume	ME (g/cm <sup>3</sup> )	% massa	% volume	ME (g/cm <sup>3</sup> )	% massa	% volume	ME (g/cm <sup>3</sup> )	% massa
2,400	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1,200	16	16	2,727	45	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,600	14	7	2,500	18	7	2,068	15	-	-	-	-	-	-
0,300	12	6	2,727	17	6	2,233	14	-	-	-	-	-	-
0,150	11	5	2,727	15	5	2,145	12	-	-	-	-	-	-
< 0,150	46	-	-	-	21	2,263	47	8	3,1	26	17	2,4	41

**Tabela 6.9 – Conversões em massa para o traço da argamassa CH 100%.**

Fração	% volume	AREIA			CINZA			CIMENTO			CAL		
		% volume	ME (g/cm <sup>3</sup> )	% massa	% volume	ME (g/cm <sup>3</sup> )	% massa	% volume	ME (g/cm <sup>3</sup> )	% massa	% volume	ME (g/cm <sup>3</sup> )	% massa
2,400	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1,200	16	16	2,727	45	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,600	14	-	-	-	14	2,068	30	-	-	-	-	-	-
0,300	12	-	-	-	12	2,233	28	-	-	-	-	-	-
0,150	11	-	-	-	11	2,145	23	-	-	-	-	-	-
< 0,150	46	-	-	-	21	2,263	47	8	3,1	26	17	2,4	41

**Tabela 6.10 – Conversões em massa para o traço da argamassa JL 50%.**

Fração	% volume	AREIA			CINZA			CIMENTO			CAL		
		% volume	ME (g/cm <sup>3</sup> )	% massa	% volume	ME (g/cm <sup>3</sup> )	% massa	% volume	ME (g/cm <sup>3</sup> )	% massa	% volume	ME (g/cm <sup>3</sup> )	% massa
2,400	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1,200	16	16	2,727	45	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,600	14	14	2,500	35	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,300	12	6	2,727	17	6	1,749	11	-	-	-	-	-	-
0,150	11	5	2,727	15	5	1,559	8	-	-	-	-	-	-
< 0,150	46	-	-	-	21	1,459	30	8	3,1	26	17	2,4	41

**Tabela 6.11 – Conversões em massa para o traço da argamassa JL 100%.**

Fração	% volume	AREIA			CINZA			CIMENTO			CAL		
		% volume	ME (g/cm <sup>3</sup> )	% massa	% volume	ME (g/cm <sup>3</sup> )	% massa	% volume	ME (g/cm <sup>3</sup> )	% massa	% volume	ME (g/cm <sup>3</sup> )	% massa
2,400	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1,200	16	16	2,727	45	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,600	14	14	2,500	35	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,300	12	-	-	-	12	1,749	22	-	-	-	-	-	-
0,150	11	-	-	-	11	1,559	17	-	-	-	-	-	-
< 0,150	46	-	-	-	21	1,459	30	8	3,1	26	17	2,4	41

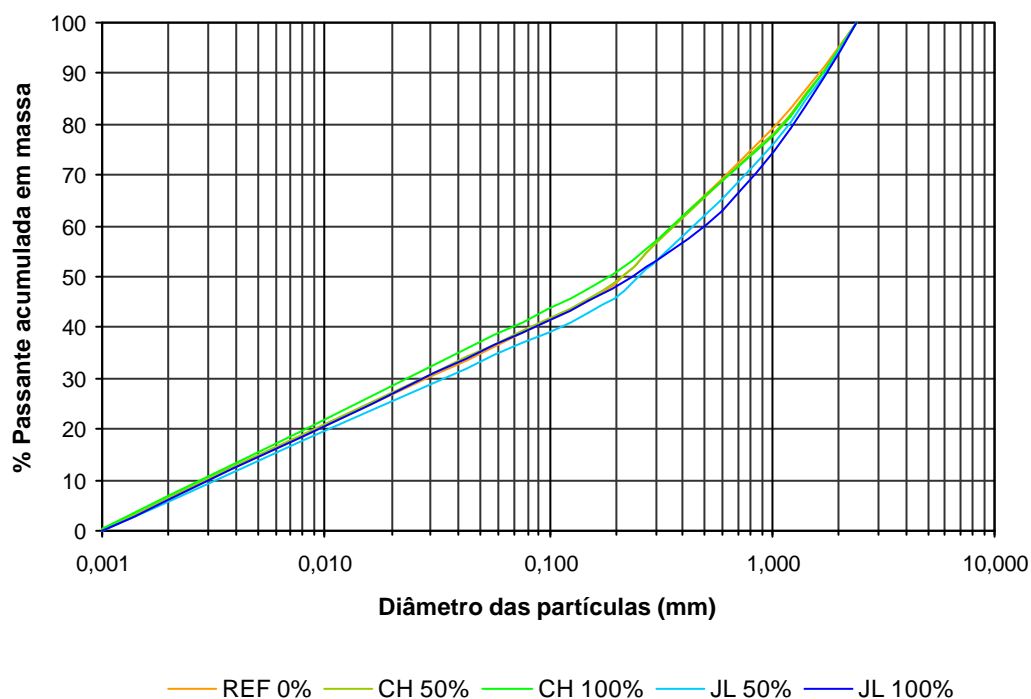
A tabela 6.12 apresenta um resumo dos traços em massa das cinco argamassas definidas anteriormente.

**Tabela 6.12 – Resumo dos traços em massa.**

Argamassa	Aglomerantes		Agregados		
	cimento	cal	areia	cinza	total
REF 0%	1	1,57	7,61	-	7,61
CH 50%	1	1,57	3,66	3,39	7,05
CH 100%	1	1,57	1,73	4,96	6,69
JL 50%	1	1,57	4,32	1,93	6,25
JL 100%	1	1,57	3,09	2,68	5,77

## 6.5 ANÁLISE DA GRANULOMETRIA DAS ARGAMASSAS

A figura 6.3 apresenta as curvas granulométricas da % passante em massa de material para cada uma das cinco argamassas.



**Figura 6.3 – Curvas granulométricas das argamassas.**

Com a intenção de classificar as granulometrias das argamassas, foi calculado o coeficiente de uniformidade ( $C_{un}$ ), conforme a equação 6.6 :

$$C_{un} = d_{60} / d_{ef} \quad \text{Equação 6.6}$$

O *diâmetro efetivo* ( $d_{ef}$ ) é o diâmetro correspondente a 10% das partículas passantes em peso total, e  $d_{60}$  é o diâmetro correspondente a 60%, seguindo o mesmo raciocínio.

Esta relação indica, na verdade, “falta de uniformidade”, pois seu valor diminui ao ser mais uniforme o material. Consideram-se, na mecânica dos solos, de granulometria muito uniforme os solos com  $C_{un} < 5$ , de uniformidade média se  $5 < C_{un} < 15$  e desuniforme quando  $C_{un} > 15$ .

Calculou-se ainda, complementarmente, o *coeficiente de curvatura*, segundo a equação 6.7,

$$C_c = (d_{30})^2 / (d_{60} \times d_{ef}) \quad \text{Equação 6.7}$$

onde  $d_{30}$  é o diâmetro correspondente a 30% das partículas passantes em massa total. Para solo bem graduados seu valor está compreendido entre 1 e 3.

Resolvendo as equações 6.6 e 6.7, com os dados das curvas granulométricas das argamassas, foram encontrados os valores apresentados na tabela 6.13.

**Tabela 6.13** – Coeficientes de uniformidade ( $C_{un}$ ) e de curvatura ( $C_c$ ) das argamassas.

Parâmetros	Argamassas				
	REF 0%	CH 50%	CH 100%	JL 50%	JL 100%
$d_{10}$	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
$d_{30}$	0,030	0,028	0,024	0,034	0,029
$d_{60}$	0,380	0,370	0,360	0,450	0,490
$C_{un}$	126,67	123,33	120,00	150,00	163,33
$C_c$	0,79	0,71	0,53	0,86	0,57

Ao observar os valores descritos acima, chega-se à conclusão que as argamassas possuem granulometria *desuniforme e mal graduada*. A classificação de mal graduada deve-se ao fato de não ocorrer predominância das partículas grossas em relação às finas.

Os valores encontrados para o coeficiente de uniformidade ( $C_{un} = 120$ ) deve-se ao fato da curva granulométrica envolver uma grande extensão de diâmetros de partículas, sendo que os diâmetros das partículas finas do sistema estão compreendidos no intervalo  $1\mu m \leq \phi \leq 150\mu m$ .

TRISTÃO (1995) concluiu que as argamassas produzidas com areias de uniformidade média ou desuniformes apresentam melhor desempenho quanto ao volume de vazios, consumo de aglomerantes e de água de amassamento, exsudação e absorção por capilaridade do que as areias muito uniformes.

## 6.6 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DAS CINZAS

Para determinar as possíveis diferenças granulométricas dos agregados compostos por partículas de cinzas e, desta forma, identificar a posterior influência dos mesmos nas propriedades das argamassas a serem investigadas, foi realizada a análise granulométrica a laser dos agregados compostos CH 100% e JL 100% sendo, em ambos os casos, avaliadas as frações passantes na peneira 0,60mm.

A figura 6.4 apresenta as curvas granulométricas dos agregados compostos com 100% dos dois tipos de cinzas em porcentagem de volume passante na peneira 0,60mm (600 $\mu m$ ).

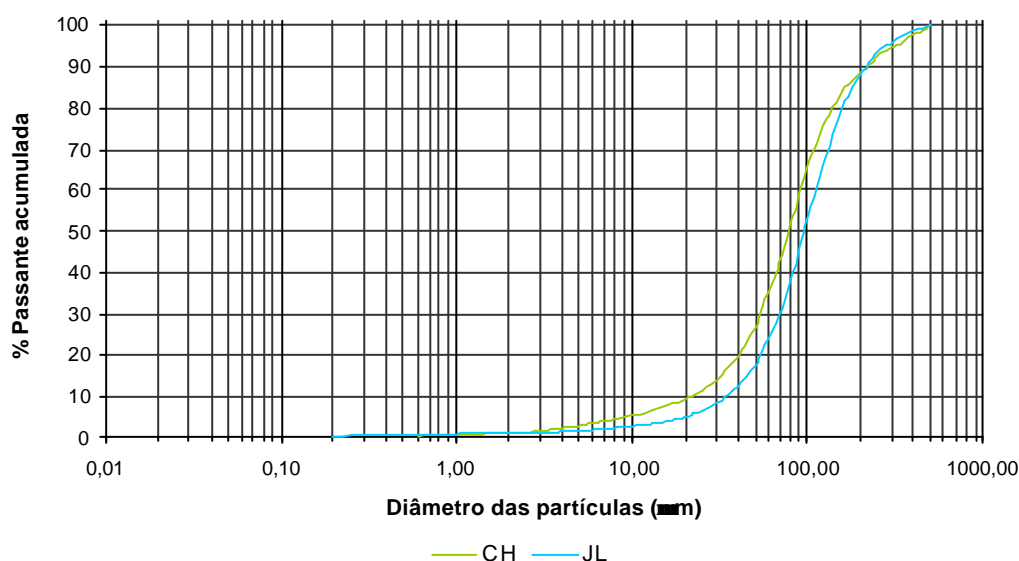


Figura 6.4 – Curvas granulométricas das cinzas passantes na peneira 600 $\mu m$ .



Ao observar as curvas granulométricas, percebe-se que em um grande intervalo a cinza Jorge Lacerda apresenta diâmetros maiores que a cinza Charqueadas. Entretanto as duas curvas possuem pontos de interseção, mostrando que a partir desses pontos a cinza Charqueadas possui diâmetros maiores. A tabela 6.14 mostra as peneiras em que ocorre a variação de diâmetros entre os dois tipos de cinzas.

**Tabela 6.14 – Variações de diâmetros das cinzas.**

# malha mm	% volume passante		maior diâmetro
	CH	JL	
500,00	100,00	100,00	JL
212,00	89,51	89,74	JL
200,00	88,47	88,12	CH
2,00	1,07	1,03	CH
1,80	0,93	0,96	JL
0,04	0,00	0,02	JL

Apesar da ocorrência das variações de diâmetros mostradas acima, pode-se concluir que as cinzas não apresentam grandes diferenças granulométricas, pois as variações de diâmetros ocorrem nos grãos mais finos, ou seja, os passantes na malha de 200µm de abertura.

## **7 Procedimento experimental**

---

### **7.1 COMPOSIÇÃO DOS AGREGADOS**

Através da metodologia descrita no capítulo anterior, foi feita a composição dos agregados utilizados nos cinco traços: REF 0%, CH 50%, CH 100%, JL 50%, JL 100%. Após a mistura somente das partículas de areia, para argamassa de referência, e das partículas de areia e de cinzas pesadas para as demais argamassas, os agregados foram caracterizados em seus aspectos físicos. Com cada composição foram realizados ensaios para a determinação da massa unitária e da massa específica aparente.

As massas unitárias dos agregados foram determinadas segundo o procedimento adaptado da NBR 7810 (1983) por LENZI (2001):

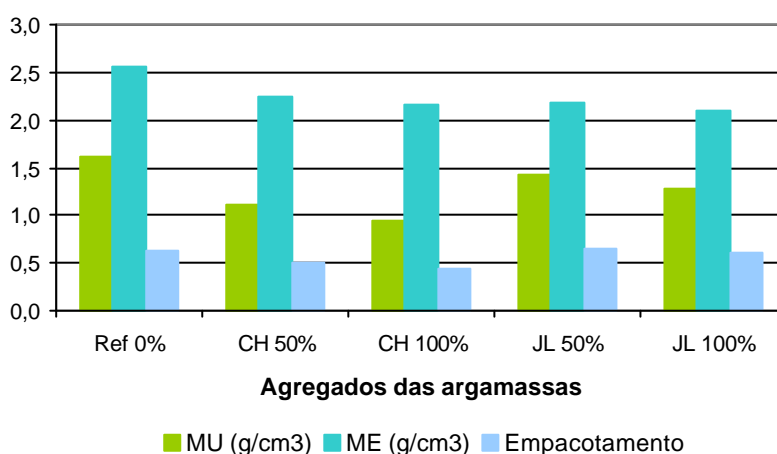
- i. o agregado é lançado de uma altura de 10cm, dentro de um recipiente cúbico de aço (5mm de espessura), medindo 15cm de aresta, com capacidade volumétrica de  $3,375\text{dm}^3$ ;
- ii. o volume é completado, sem fazer a rasadura, e a areia é adensada, colocando-se o recipiente cúbico sobre a mesa de queda livre (*flow table*), descrita na NBR 7215, mediante dez golpes em 10 segundos;
- iii. completa-se novamente o volume, sem rasar, submetendo o recipiente a mais cinco golpes na mesa de queda livre, em 5 segundos;
- iv. mais uma vez o volume é completado, faz-se a rasadura do topo do recipiente com uma régua metálica, formando  $90^\circ$  com a superfície da areia em movimentos de vai e vem;
- v. é feita a leitura da massa de areia contida no recipiente em balança com precisão de 0,1 grama;

- vi. dividindo a massa da areia pela capacidade volumétrica do recipiente, encontra-se a massa unitária.

A massa específica aparente de cada composição foi determinada pelo processo do picnômetro, utilizando frascos com 500 ml de volume. Os resultados de ambos ensaios são apresentados na tabela 7.1 e na figura 7.1.

**Tabela 7.1 – Características físicas dos agregados compostos.**

<b>Agregado do traço</b>	<b>MU (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>ME (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Vazios (%) (1 - MU/ME) x 100</b>	<b>Empacotamento (MU/ME)</b>
<b>Ref 0%</b>	1,609	2,554	37,014	0,630
<b>CH 50%</b>	1,111	2,241	50,412	0,496
<b>CH 100%</b>	0,945	2,169	56,429	0,436
<b>JL 50%</b>	1,431	2,183	34,454	0,655
<b>JL 100%</b>	1,277	2,102	39,241	0,608



**Figura 7.1 – Resumo das características físicas dos agregados compostos.**

## 7.2 PREPARAÇÃO DAS ARGAMASSAS

A partir da definição dos traços, foi iniciada a produção das argamassas, que foram submetidas aos ensaios abaixo descritos, com o intuito de avaliar, de forma comparativa, as propriedades das mesmas.

***Ensaio no estado fresco:***

- 1) Consistência (NBR 13276/1995)
- 2) Capacidade de retenção de água (NBR 9287/1986)
- 3) Massa específica (NBR 13278/1995)
- 4) Teor de ar incorporado (NBR 13278/1995)
- 5) Exsudação (RILEM MR-6/1982)
- 6) Início e fim de pega (CERIB Fiche 34/1994)

***Ensaio no estado endurecido:***

- 1) Resistência à compressão (NBR 13279/1995)
- 2) Absorção de água por imersão (NBR 9778/1987)
- 3) Índice de vazios (NBR 9778/1987)
- 4) Massa específica (NBR 9778/1987)
- 5) Absorção de água por capilaridade (NBR 9779/1987)
- 6) Resistência de aderência à tração (NBR 13528/1995)

Os agregados e os aglomerantes foram pré-misturados a seco antes da preparação das argamassas. A finalidade deste procedimento é a de simular a mistura de argamassas industrializadas, em que a água é adicionada à mistura seca somente no momento da preparação da massa fresca. Deste modo, não houve maturação da cal hidratada, que é um procedimento comum na confecção de argamassas mistas rodadas em obra.

Para a realização dos ensaios em que o volume necessário de argamassa fosse inferior a dois litros – consistência, retenção de água, início e fim de pega – foi utilizado um misturador mecânico conforme o descrito na NBR 7215 (1982).

Já para os ensaios em que o volume de argamassa necessário fosse superior a dois litros, utilizou-se misturador mecânico contendo cuba de aço inoxidável com

capacidade aproximada de 20 litros, com pá tipo globo em aço inoxidável, que gira em torno de si mesmo e, em movimento planetário, em torno do eixo da cuba, movimentos estes dirigidos em sentidos opostos. Constituem estes ensaios: exsudação, todos os ensaios realizados com corpos-de-prova no estado endurecido (em que foram moldados 25 exemplares a partir de uma mesma mistura) e o ensaio de resistência de aderência à tração.

Os tempos de mistura das argamassas a serem avaliadas obedeceram aos tempos prescritos nas normas específicas para os ensaios.

Com o objetivo de obter argamassas de mesma trabalhabilidade sem usar aditivos, fixou-se a consistência. De cada argamassa determinou-se o teor de água para atingir a consistência, fixada em  $255 \pm 10$  mm, por meio do ensaio na mesa de consistência (*flow table*), conforme NBR 13276 (1995). Buscou-se a quantidade de água por tentativa, sendo que o teor de água final foi comprovado pelo ensaio de verificação, sem adições complementares de água.

As tabelas 7.2 a 7.5 apresentam a relação entre os materiais que compõem as argamassas, inclusive a quantidade de água.

**Tabela 7.2 – Composição dos traços em massa.**

<b>Traços</b>	<b>Composição dos traços em massa</b>						<b>Flow table (mm)</b>
	aglomerantes (agl) cimento (c)	cal	areia	cinzas (czp)	agregado total	água (a)	
REF 0%	1,00	1,57	7,47	0	7,47	1,90	258,47
CH 50%	1,00	1,57	3,66	3,39	7,05	2,99	257,77
CH 100%	1,00	1,57	1,73	4,96	6,69	3,68	255,47
JL 50%	1,00	1,57	4,32	1,93	6,25	2,09	264,67
JL 100%	1,00	1,57	3,09	2,68	5,77	1,40	258,00

**Tabela 7.3 – Composição dos traços em volume.**

<b>Traços</b>	<b>Composição dos traços em volume</b>						<b>Flow table (mm)</b>
	aglomerantes (agl) cimento (c)	cal	areia	cinzas (czp)	agregado total	água (a)	
REF 0%	1,00	1,99	9,05	-	9,05	5,87	258,47
CH 50%	1,00	1,99	4,32	5,49	9,81	9,24	257,77
CH 100%	1,00	1,99	1,96	7,98	9,95	11,38	255,47
JL 50%	1,00	1,99	5,22	3,30	8,53	6,46	264,67
JL 100%	1,00	1,99	3,83	4,87	8,71	6,80	258,00

**Tabela 7.4 – Relação dos materiais em massa.**

Traços	Relações (em <i>massa</i> ) de materiais					
	a/c	a/agl	c/czp	agl/czp	areia/czp	a/mat.secos
REF 0%	1,90	0,74	-	-	-	0,19
CH 50%	2,99	1,16	0,29	0,76	1,08	0,31
CH 100%	3,68	1,43	0,20	0,52	0,35	0,40
JL 50%	2,09	0,81	0,52	1,33	2,24	0,24
JL 100%	1,40	0,70	0,59	1,17	1,15	0,26

**Tabela 7.5 – Relação dos materiais em volume.**

Traços	Relações (em <i>volume</i> ) de materiais					
	a/c	a/agl	c/czp	agl/czp	areia/czp	a/mat.secos
REF 0%	5,87	1,96	-	-	-	0,49
CH 50%	9,24	3,09	0,18	0,54	0,79	0,72
CH 100%	11,38	3,81	0,13	0,37	0,25	0,88
JL 50%	6,46	2,16	0,30	0,90	1,58	0,56
JL 100%	6,80	2,27	0,21	0,61	0,79	0,58

Os valores das proporções dos materiais foram apresentados em massa e em volume com o objetivo de poder determinar os consumos específicos dos materiais constituintes de cada argamassa.

**PARTE I – Introdução e dados de literatura**

**PARTE II – Procedimento experimental**

**PARTE III – Análise dos dados coletados**

**PARTE IV – Conclusões e Recomendações**

**PARTE V – Bibliografia e anexos**

## 8 Propriedades das argamassas no estado fresco

---

### 8.1 TRABALHABILIDADE

A trabalhabilidade relaciona-se principalmente à consistência, através da qual é avaliada tecnologicamente. A consistência é a propriedade da argamassa pela qual esta tende a resistir à deformação e, a manutenção da consistência através do tempo diz respeito à capacidade da argamassa manter esta tendência ao longo do tempo de aplicação.

Com o objetivo de analisar as argamassas com a mesma trabalhabilidade, sem usar aditivos, fixou-se a consistência. Para cada argamassa foi determinado o teor de água para atingir a consistência de  $255 \pm 10$  mm de diâmetro de espalhamento, por meio do ensaio na mesa de consistência (*flow table* – figura 8.1), conforme NBR 13276 (1995).



Figura 8.1 – Mesa de queda livre da ABNT (*flow table*).

A consistência característica de cada argamassa é indicada na coluna denominada *flow table*, da tabela 8.1. Esta tabela também apresenta, para cada argamassa, o traço unitário em massa, a relação água/cimento, o coeficiente de



uniformidade (Cun) além das características de cada agregado composto relacionadas com as massas unitárias (MU) e específicas (ME).

**Tabela 8.1 – Características de dosagem das argamassas e características dos agregados compostos.**

Argamassa	Traço unitário em massa (cimento:cal:areia:cinza)	Relação água / cimento	Flow Table f (mm)	Coeficiente de uniformidade das argamassas	Características dos agregados compostos			
					MU (g/cm <sup>3</sup> )	ME (g/cm <sup>3</sup> )	Vazios (%) (1 - MU/ME) x 100	Empacotamento (MU/ME)
REF 0%	1: 1,57: 7,47: 0,00	1,90	258,47	126,67	1,61	2,55	37,01	0,63
CH 50%	1: 1,57: 3,66: 3,39	2,99	257,77	123,33	1,11	2,24	50,41	0,50
CH 100%	1: 1,57: 1,73: 4,96	3,68	255,47	120,00	0,95	2,17	56,43	0,44
JL 50%	1: 1,57: 4,32: 1,93	2,09	264,67	150,00	1,43	2,18	34,45	0,66
JL 100%	1: 1,57: 3,09: 2,68	1,40	258,00	163,33	1,28	2,10	39,24	0,61

As argamassas compostas com a incorporação das cinzas pesadas, com exceção da argamassa JL 100%, apresentaram uma maior demanda de água de amassamento para que fosse atingida a consistência de 255±10mm de diâmetro de espalhamento.

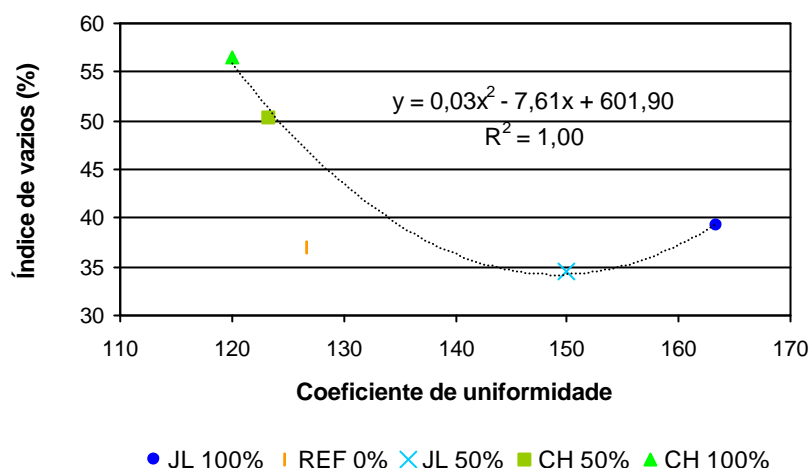
SELMO (1986) considera que quanto maior o índice de vazios e área específica do agregado, maior o consumo de aglomerantes e de água de amassamento sendo, portanto, estas características que regem a quantidade de água.

A tabela 8.2 apresenta os resultados da determinação, por adsorção de nitrogênio, da área específica de cada fração dos dois tipos de cinza utilizados na composição dos agregados. Pode-se observar nesta tabela que os valores da área específica das cinzas oriundas de Charqueadas são maiores, para todas as frações, do que os valores obtidos para as cinzas oriundas de Jorge Lacerda. Os traços que exigiram maiores demandas de água foram os das argamassas compostas com as cinzas CH, ou seja, CH 50% e CH 100%, cujos agregados compostos também apresentaram maior índice de vazios em comparação com os demais.

**Tabela 8.2 – Área específicas das frações de cinza.**

Fração (mm)	Área Específica (m <sup>2</sup> /g)	
	cinzas CH	cinzas JL
< 0,15	14,53	5,00
0,15	17,92	1,36
0,30	12,85	1,14
0,60	48,13	-

A figura 8.2 apresenta a correlação entre o índice de vazios dos agregados e o coeficiente de uniformidade das argamassas. Observa-se que existe uma boa correlação entre esses dois fatores.



**Figura 8.2 – Variação do índice de vazios dos agregados com os coeficientes de uniformidade das argamassas.**

Da correlação encontrada, e baseando-se no fato de que quanto maior o volume de vazios do agregado, maior o volume de pasta necessário, conclui-se que as argamassas CH 50% e CH 100% estariam sujeitas a uma maior retração potencial da argamassa. Como neste estudo as quantidades dos aglomerantes foram fixadas para todas as argamassas, mantendo a relação em volume igual a **1: 2** (cimento: cal), pode-se concluir que o maior consumo de pasta se manifestará em maior consumo de água, podendo prejudicar algumas propriedades das argamassas CH 50% e CH 100% no estado endurecido como a resistência à compressão, o aumento do índice de vazios e da permeabilidade.

Em relação ao gráfico apresentado acima, vale salientar que este trabalho tem o objetivo de avaliar o comportamento de argamassas compostas com cinzas de carvão pulverizado provenientes de dois processos termelétricos diferentes. Desta forma, o traço de referência (REF 0%) é apresentado em todos os gráficos, mas apenas de forma ilustrativa, não fazendo parte da linha de tendência das correlações obtidas.

Os resultados da demanda de água também são associados à relação **a/c** (água/cimento), **a/agl** (água/aglomerante, considerando-se o aglomerante constituído pela quantidade de cal e do cimento Portland) e à relação **a/mat secos** (água / materiais secos, sendo os materiais secos constituídos pela quantidade total de agregados e de aglomerantes). Desta forma, esses fatores também foram correlacionados (em massa) com o índice de vazios dos agregados compostos (figura 8.3).

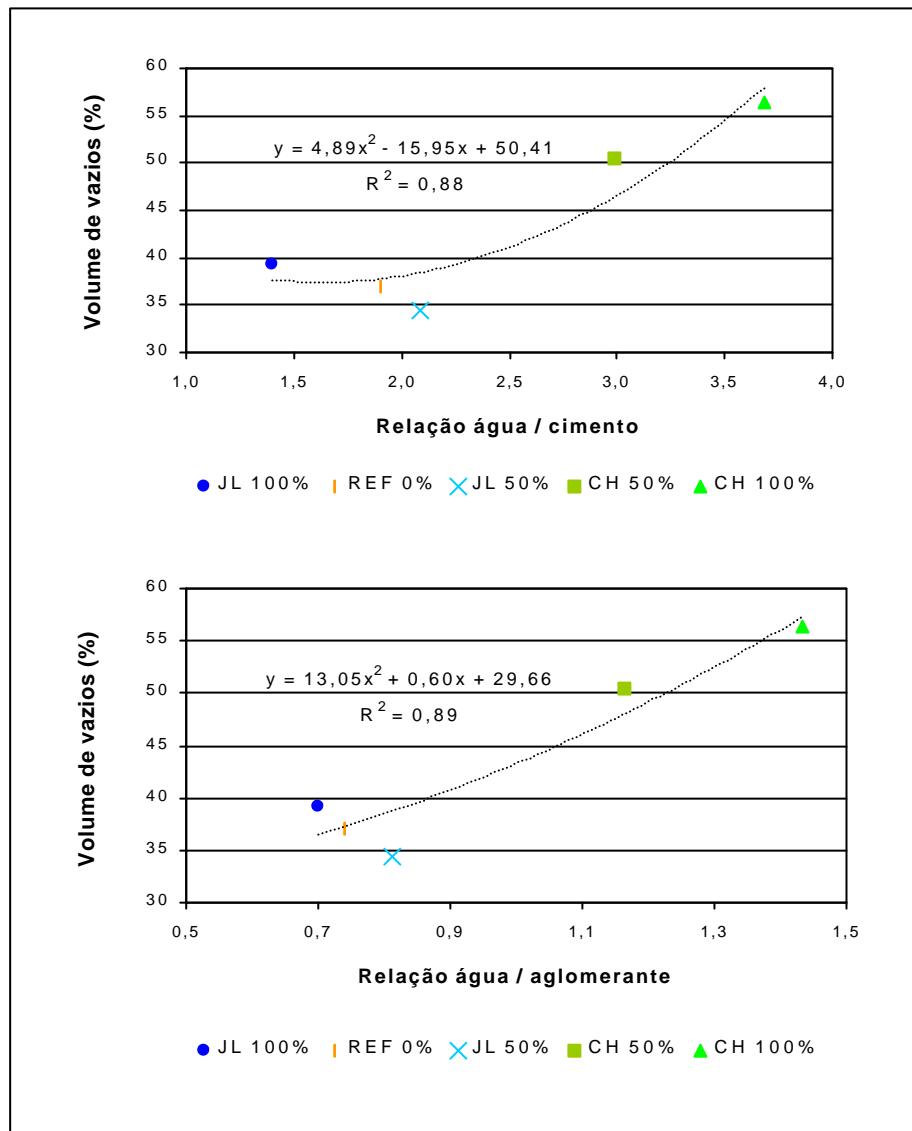
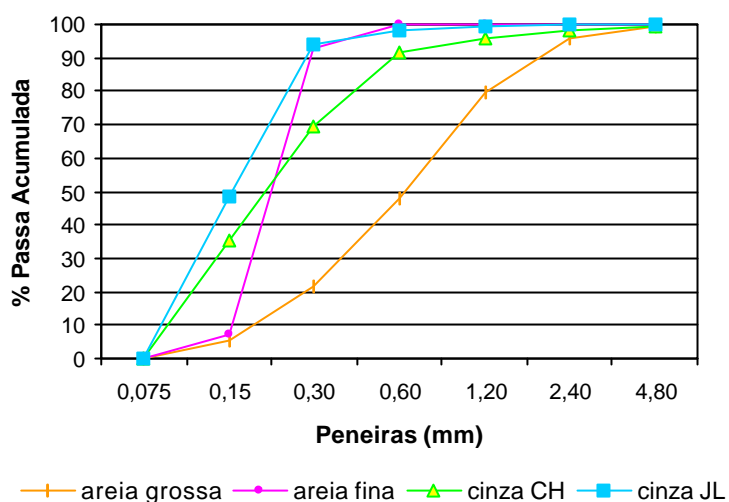


Figura 8.3 – Demanda de água das argamassas em relação ao índice de vazios dos agregados.

Da análise da figura 8.3, conclui-se:

- i. O primeiro gráfico, que correlaciona o índice de vazios dos agregados e o fator água/cimento, confirma que quanto maior a quantidade de vazios no agregado, maior a demanda de água. A argamassa JL 100% apresentou menor consumo de água que a argamassa REF 0%, mesmo possuindo maior índice de vazios, provavelmente pelo fato de seu agregado composto conter um maior teor de finos devido à substituição total da areia por cinzas Jorge Lacerda nas frações menores que 0,60mm, conforme mostra a figura 8.4. Já a argamassa JL 50%, apesar de também conter mais finos que a argamassa REF 0%, foi a que obteve maior

diâmetro de espalhamento (264,67mm), o que justifica o aumento da quantidade da água de amassamento.



**Figura 8.4 – Granulometria dos materiais utilizados nos agregados compostos.**

- ii. O gráfico que apresenta a correlação entre o índice de vazios e o fator água/aglomerante, possui tanto um valor de  $R^2$  quanto uma conformação semelhante ao gráfico que correlaciona o índice de vazios ao fator água/cimento. O que já era esperado, pois como a proporção dos aglomerantes para todas as argamassas é fixa, a divisão da quantidade de água pela quantidade de aglomerantes difere da relação água/cimento por uma constante (a quantidade de cal) adicionada ao denominador.

### 8.1.1 Perda de trabalhabilidade

Foi medida, para todas as argamassas, a perda de trabalhabilidade com a finalidade de avaliar a influência dos agregados compostos na manutenção da consistência das argamassas produzidas. Para isso, as argamassas foram confeccionadas dentro dos parâmetros prescritos na norma NBR 13276 (1995) e foram determinados os diâmetros de espalhamento na mesa de queda livre (*flow table*).

Após a primeira leitura de diâmetros, as argamassas permaneceram em repouso, em sala climatizada à temperatura constante de 25°C, até o momento da próxima leitura. Então se homogeneizava a argamassa na argamassadeira, em velocidade baixa por 30s, para levá-la à mesa de queda livre para uma nova leitura dos diâmetros de espalhamento, respeitando o intervalo de uma hora entre as leituras. Para cada leitura

foram realizadas duas medidas de diâmetros nos eixos ortogonais, adotando no final os valores médios encontrados.

O cálculo da perda de trabalhabilidade foi feito através da equação 8.1.

$$Perda(\%) = \frac{(\Phi_{inicial} - \Phi_n) \times 100}{\Phi_{inicial}}$$

**Equação 8.1**

Sendo:

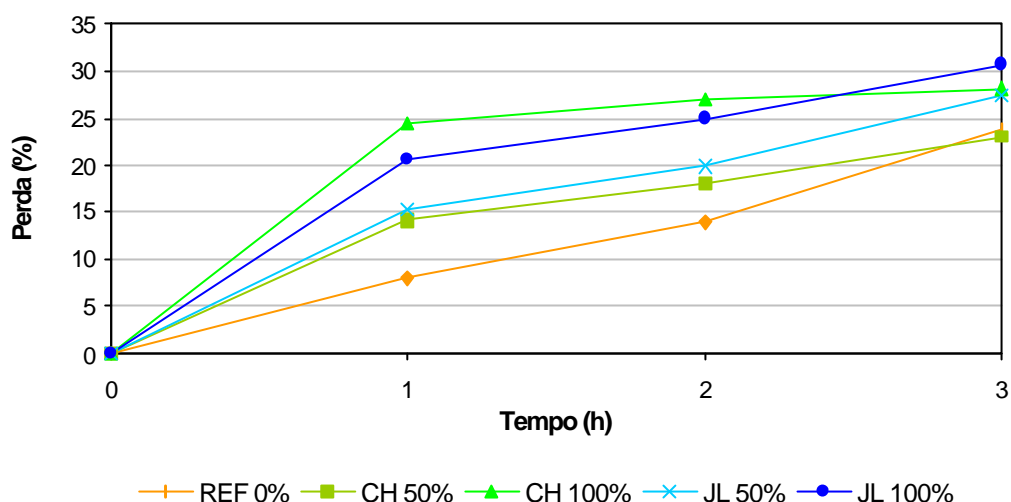
$\Phi_{inicial}$  = diâmetro de espalhamento (valor médio);

$\Phi_n$  = diâmetro de espalhamento nos instantes t = 0, 1, 2 e 3h.

Os resultados obtidos são apresentados na tabela 8.3 e plotados no gráfico da figura 8.5.

**Tabela 8.3 – Diâmetros de espalhamento e porcentagens de perda de trabalhabilidade.**

Argamassa	Determinações	Tempo (h)			
		0	1	2	3
REF 0%	$\phi$ médio (mm)	290	267	249	221
	(%) perda	0	8	14	24
CH 50%	$\phi$ médio (mm)	266	228	218	205
	(%) perda	0	14	18	23
CH 100%	$\phi$ médio (mm)	271	205	198	195
	(%) perda	0	24	27	28
JL 50%	$\phi$ médio (mm)	255	216	204	185
	(%) perda	0	15	20	27
JL 100%	$\phi$ médio (mm)	251	199	189	174
	(%) perda	0	21	25	31



**Figura 8.5 – Evolução da perda de trabalhabilidade.**

Da análise do gráfico, conclui-se que o teor de substituição da areia por cinza pesadas exerce influência na perda da trabalhabilidade das argamassas. As argamassas que apresentaram maior porcentagem de perda de diâmetro de espalhamento foram as argamassas com 100% de substituição da areia pelas cinzas dos dois tipos, este fato deve ser atribuído à absorção das cinzas ao longo do tempo.

Não foi observada nenhuma relação da perda da trabalhabilidade com a demanda de água de amassamento ou com o índice de vazios dos agregados. O tempo do ensaio foi restringido a 3 horas devido à rigidez apresentada pelas argamassas neste tempo, principalmente nas argamassas JL 50% e JL 100%.

## 8.2 CONSUMO DOS MATERIAIS E DE VOLUME DE PASTA

A importância do cálculo do consumo dos materiais e de volume de pasta (água e aglomerantes) está em verificar a viabilidade econômica e o rendimento de uma argamassa. Como os aglomerantes são os componentes de maior custo na dosagem de uma argamassa, a economia está relacionada à utilização de um agregado com uma granulometria que possibilite uma estrutura compacta e que tenha menor área de superfície específica, pois isso diminuirá o volume de pasta na argamassa.

As características do agregado, como índice de vazios e massa unitária, estão estreitamente relacionadas ao volume de pasta consumido pelas argamassas. Essas

duas características são relevantes para a avaliação do agregado empregado em argamassas, sobretudo quando for necessária a escolha entre dois tipos de agregados, pois os vazios do agregado deverão ser preenchidos por pasta para atingir uma trabalhabilidade desejável.

O consumo dos materiais (cimento, cal, areia e cinzas) e de volume de pasta por metro cúbico de argamassa fresca foi calculado considerando 0% de umidade nos agregados e 0% o teor de ar aprisionado na argamassa. O cálculo foi realizado de acordo com os procedimentos descritos a seguir

- a) Cálculo do consumo de cimento, cal, areia e cinza, a partir do traço em massa **1: cal: areia: cinza: a/c** para 1 metro cúbico de argamassa. Primeiramente foi calculado o consumo de cimento através da equação 8.2:

$$C_{\text{cim}} = \frac{1000}{\left( \frac{1}{\delta_{\text{cim}}} + \frac{\text{cal}}{\delta_{\text{cal}}} + \frac{\text{areia}}{\delta_{\text{areia}}} + \frac{\text{cinza}}{\delta_{\text{cinza}}} + \frac{a}{c} \right)}$$

**Equação 8.2**

Sendo:

- $C_{\text{cim}}$  – consumo de cimento em  $\text{kg/m}^3$ ;
- $\delta_{\text{cim}}$  – massa específica do cimento ( $\text{kg/dm}^3$ );
- cal – quantidade de cal do traço unitário em massa (kg);
- $\delta_{\text{cal}}$  – massa específica da cal ( $\text{Kg/dm}^3$ );
- areia – quantidade de areia do traço unitário em massa (kg);
- $\delta_{\text{areia}}$  – massa específica da areia ( $\text{Kg/dm}^3$ );
- cinza – quantidade de cinza do traço unitário em massa (kg);
- $\delta_{\text{cinza}}$  – massa específica do cinza pesada ( $\text{Kg/dm}^3$ );
- a/c – relação água/cimento em massa.

O consumo dos materiais restantes foi calculado pelo produto da quantidade de material (traço unitário) em massa pelo consumo de cimento.

- b) Cálculo do volume absoluto de pasta fresca a partir do traço em volume **1: cal: areia: cinza: a/c**, sem considerar o teor de ar aprisionado, através da equação 9.3, em que a letra **V** simboliza a quantidade em volume do material:

$$V_{pasta} = \frac{V_{(cimento + cal + água) \times 10^{-3}}}{V_{argamassa}} (l/m^3)$$

**Equação 8.3**

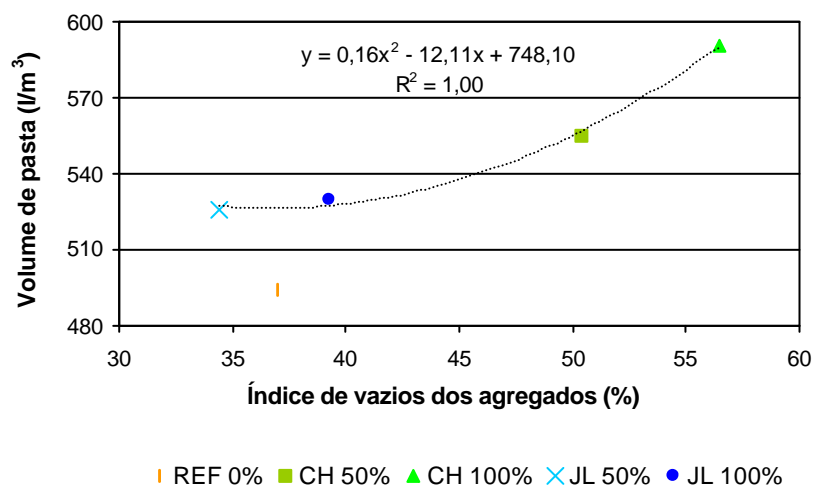
Sendo o volume de argamassa ( $V_{argamassa}$ ) o somatório dos volumes de todos os materiais constituintes, ou seja, cimento, cal, areia, cinza e água.

Os dados do consumo de materiais e do volume de pasta constam na tabela 9.4, apresentada abaixo.

Tabela 8.4 – Consumo de materiais em massa e consumo de pasta.

Traços	Consumo de materiais em massa (kg/m <sup>3</sup> )					Volume pasta l/m <sup>3</sup>
	aglomerantes (agl) cimento (c)	cal	areia	cinzas (czp)	agregado total	água (a)
REF 0%	172,52	270,85	1288,71	0,00	1288,71	327,79
CH 50%	140,21	220,13	513,33	475,80	989,13	419,24
CH 100%	127,09	199,53	220,27	630,28	850,55	467,96
JL 50%	171,93	269,93	743,24	331,85	1075,09	359,18
JL 100%	167,09	262,34	515,99	448,17	964,15	367,61

A quantidade de vazios presente nos agregados indica o grau de compacidade, ou fator de empacotamento dos mesmos, estando diretamente relacionada com o volume de pasta consumido na argamassa. A figura 8.6 apresenta a correlação entre o consumo de pasta em l/m<sup>3</sup> e o índice de vazios dos agregados.



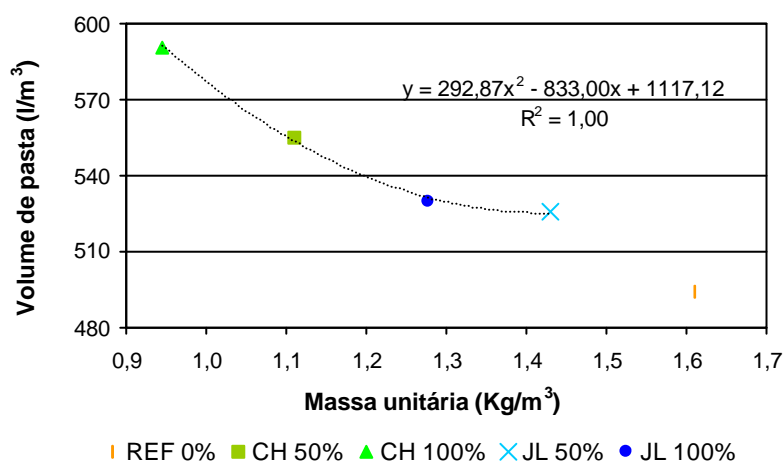
**Figura 8.6 – Relação entre o volume de pasta consumido e o índice de vazios dos agregados.**



A correlação obtida entre o volume de pasta consumido e o índice de vazios dos agregados confirma os dados encontrados em literatura, ou seja, com o aumento do índice de vazios aumenta o consumo de volume de pasta. Pode ser observado também que na medida em que aumenta a substituição da areia por cinza pesada ocorre um acréscimo no volume de pasta consumido. Este fato pode ser explicado pelo aumento da área de superfície específica, principalmente quando se compara os resultados das argamassas dosadas com cinzas Jorge Lacerda com os obtidos pelas argamassas contendo cinzas Charqueadas.

O índice de vazios dos agregados é obtido através da relação entre o volume de vazios (obtido dividindo-se a massa unitária ( $\text{g/cm}^3$ ) pela a massa específica ( $\text{g/cm}^3$ ) do agregado) e o volume total, sendo um valor adimensional. Das duas características do agregado que determinam o índice de vazios, a massa unitária se torna a mais importante, pois melhor representa a disposição dos natural dos grãos.

A figura 8.7 apresenta a variação do consumo de pasta em volume com a massa unitária dos agregados.



**Figura 8.7 – Variação do volume de pasta consumido com a massa unitária dos agregados.**

O gráfico da figura 8.7 mostra que a disposição dos grãos, evidenciada pela massa unitária dos agregados, exerce grande influência no volume de pasta consumido pelas argamassas. O formato irregular dos grãos da cinza Charqueadas prejudicou o empacotamento aumentando os vazios entre eles e, juntamente com os valores de área de superfície específica, superiores em relação aos da cinza Jorge Lacerda, resultou em um maior consumo de pasta.

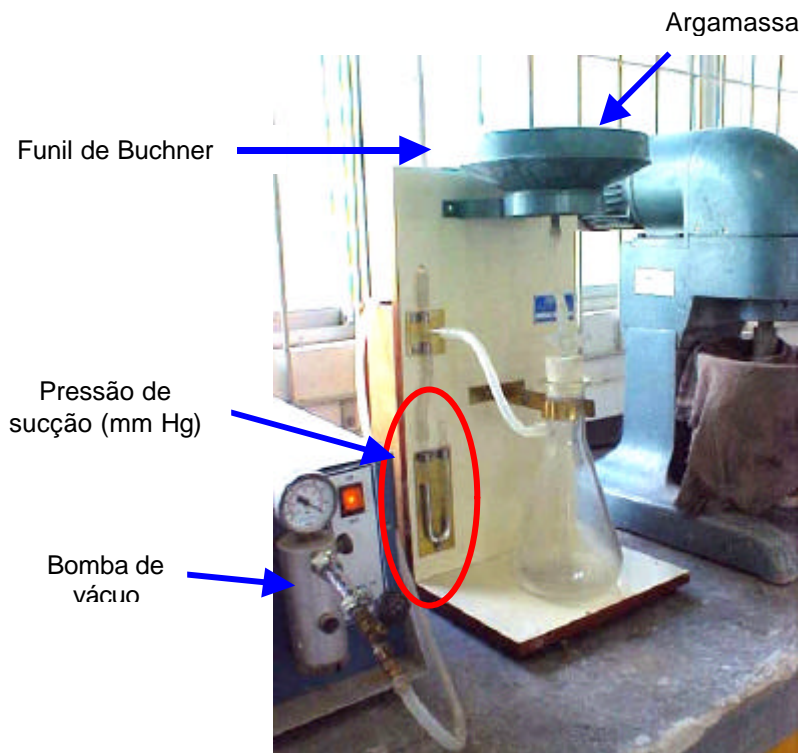
As análises da influência do índice de vazios e da massa unitária dos agregados no consumo de pasta confirma a relevância dessas duas características na avaliação do agregado utilizado em argamassas, podendo ser um fator determinante na escolha entre dois tipos de agregados.

### **8.3 CAPACIDADE DE RETENÇÃO DA CONSISTÊNCIA**

A determinação da capacidade de reter água e de retenção de consistência é de considerável importância prática, particularmente se a argamassa está sendo aplicada sobre materiais de alta sucção. Uma vez que a consistência de uma dada argamassa depende dos seus conteúdos de água e de ar, não é suficiente para todas as argamassas medir apenas a água retida sob condições padronizadas de teste, sendo assim mais útil, de um modo geral, a medida da retenção da consistência, conforme citam CARASEK & DJANIKIAN (1993).

Para a determinação da retenção de consistência das argamassas estudadas foram seguidos os procedimentos descritos na NBR 9287 (1986) – Argamassa de assentamento para alvenaria de blocos de concreto – Determinação da retenção de água, não sendo feita nenhuma adaptação na metodologia apesar das argamassas ensaiadas se destinarem ao revestimento de elementos de alvenaria.

Ressalta-se que a denominação deste ensaio não é muito correta, pois conforme o procedimento prescrito, o resultado do ensaio permite avaliar a retenção de consistência e não a retenção de água da argamassa. O método consiste na determinação do índice de consistência na mesa ABNT (*flow table*) antes e após uma determinada quantidade de argamassa ser submetida a uma sucção, com pressão correspondente a uma coluna de 51mm de Hg, em um funil (funil de Buchner modificado) forrado com papel filtro ( $80\text{g/m}^2$ ), durante 60s. O equipamento utilizado nesse ensaio pode ser visto através da figura 8.8.



**Figura 8.8 – Equipamento para ensaio de retenção de água (NBR 9287/1986).**

A diferença entre os diâmetros médios de espalhamento (inicial e final), em porcentagem, é o índice de retenção de consistência, conforme indicado na equação 8.4.

$$R = \frac{(A - 125)}{(B - 125)} \times 100$$

**Equação 8.4**

Sendo,

R – valor do índice de retenção de consistência, em porcentagem.

A – valor do diâmetro de espalhamento em mm, após a sucção.

B – valor do diâmetro de espalhamento em mm, antes de ser aplicada a sucção.

A figura 8.9 apresenta duas fotos mostrando a variação dos diâmetros de espalhamento da argamassa JL 100%, antes e depois da sucção. Os valores do índice de retenção de água para as argamassas estudadas são apresentados na tabela 8.5 e na figura 8.10.



a) Diâmetro de espalhamento antes da sucção.



b) Diâmetro de espalhamento depois da sucção.

Figura 8.9 – Variação do diâmetro de espalhamento da argamassa JL 100% após o ensaio de retenção de consistência.

Tabela 8.5 – Índice de retenção de água das argamassas.

ARGAMASSAS	ÍNDICE DE RETENÇÃO DE ÁGUA (%)
REF 0%	77,53
CH 50%	55,65
CH 100%	53,52
JL 50%	62,10
JL 100%	57,68

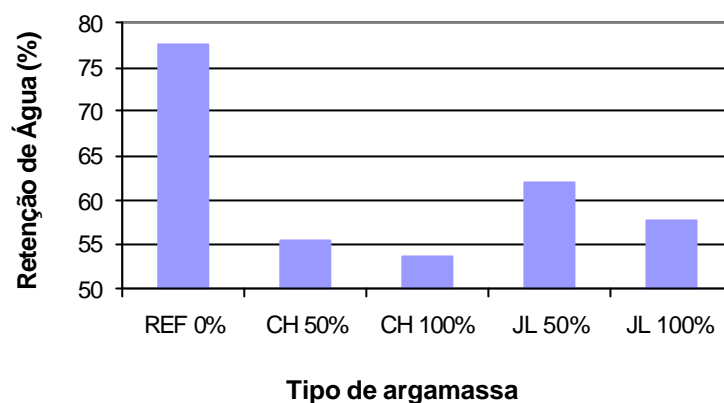


Figura 8.10 – Valores do índice de retenção de consistência das argamassas.

Da análise do gráfico apresentado na figura 8.10 observar-se que, para os dois tipos de cinzas, ocorreu um decréscimo da retenção de água com o aumento da substituição da areia por cinza pesada.

É de conhecimento comum que a quantidade de aglomerante está intimamente ligada à retenção de consistência nas argamassas (CINCOTTO et al, 1995). Como as argamassas avaliadas no presente trabalho foram dosadas com a mesma quantidade de cimento e cal, foi feita então a correlação entre o índice de retenção de consistência e a relação cinza pesada / aglomerante, excluindo desta a argamassa REF 0%. Como pode ser observado na figura 8.11, foi encontrada uma correlação satisfatória entre esses dois fatores.

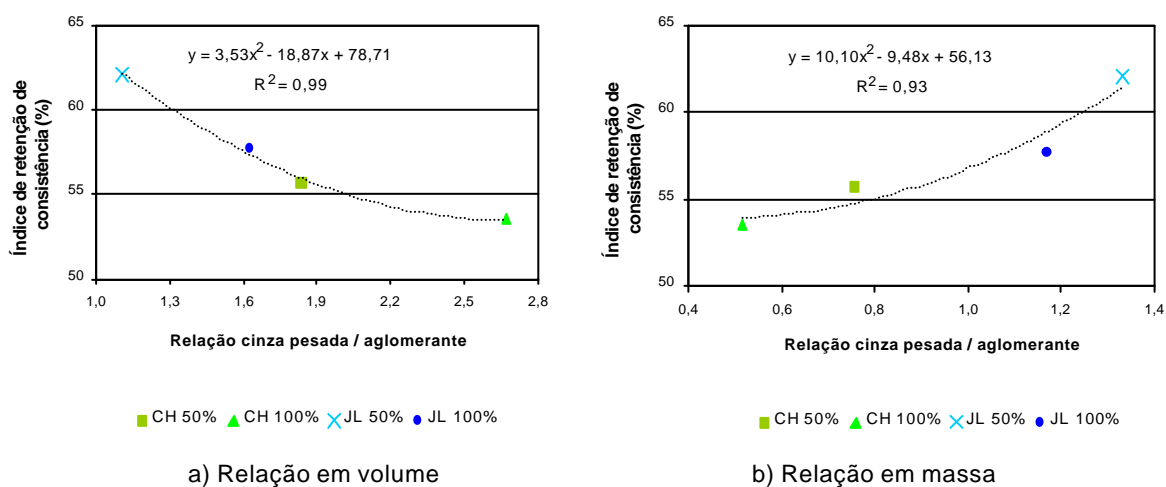


Figura 8.11 – Correlação entre o índice de consistência e a relação cinza pesada / aglomerante.

As correlações apresentadas nos gráficos acima confirmam que o aumento da incorporação de cinzas, em massa ou volume, nas argamassas provoca o decréscimo na retenção de água e na retenção de consistência.

#### 8.4 MASSA ESPECÍFICA

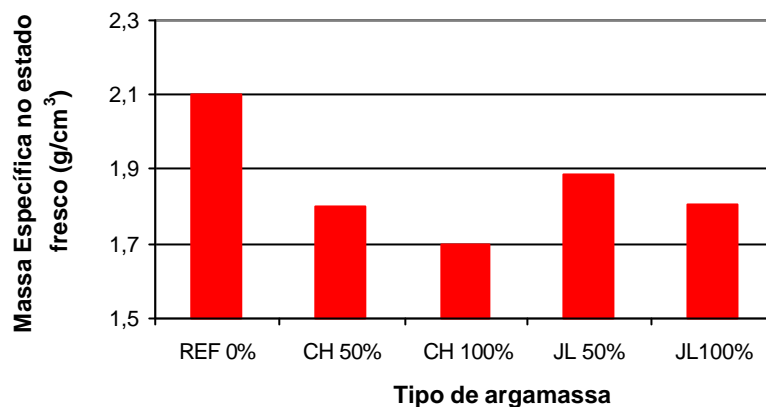
As massas específicas das argamassas foram determinadas de acordo com os procedimentos da NBR 13278 (1995) modificados.

A modificação básica consistiu na substituição do recipiente de PVC com 400ml de capacidade de volume por 25 moldes cilíndricos de aço com diâmetro médio de 50mm e altura média de 100mm, com volume médio de 196,35ml. O cálculo da capacidade volumétrica real de cada molde foi efetuado com os valores reais de altura e diâmetro, que foram verificados com o auxílio de um paquímetro. A massa específica obtida foi a média das determinações nas 25 amostras. A moldagem desses cilindros obedeceu aos procedimentos da NBR 7215 (1982).

Os valores médios das massas específicas de cada argamassa estão apresentados na tabela 8.6 e no gráfico da figura 8.12.

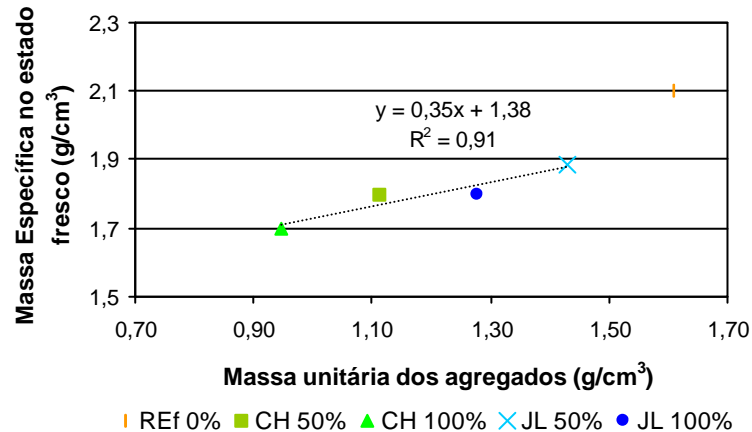
**Tabela 8.6 – Massas específicas das argamassas no estado fresco.**

<b>Argamassa</b>	<b>Massa específica no estado fresco (g/cm<sup>3</sup>)</b>
REf 0%	2,102
CH 50%	1,795
CH 100%	1,697
JL 50%	1,883
JL 100%	1,800



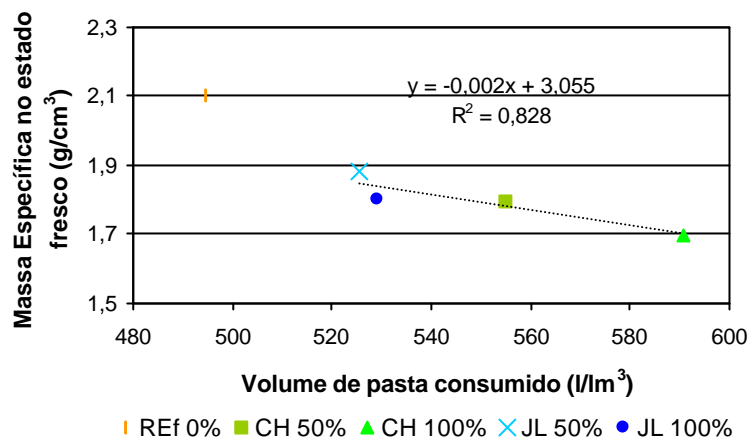
**Figura 8.12 – Massas específicas das argamassas no estado fresco.**

O gráfico da figura 8.12 mostra que a massa específica sofre um decréscimo na medida em que aumentam os teores de substituição da areia pela cinza pesada. Este fato pode ser explicado pela diferença de massa dos materiais constituintes dos agregados. Para confirmar esta afirmação, foi feita uma correlação entre a massa específica das argamassas e a massa unitária dos agregados, conforme mostra a figura 8.13.



**Figura 8.13 – Correlação entre a massa específica no estado fresco e a massa unitária dos agregados.**

A correlação obtida no gráfico da figura 8.13 mostra que à medida que aumenta a massa unitária dos agregados ocorre um aumento linear da massa específica das argamassas, confirmando as conclusões do trabalho de TRISTÃO (1995). Este resultado é plausível, pois como a quantidade de aglomerantes é a mesma para todos os traços, a diferença nos valores de massa específica seria explicada pela diferença de massa dos agregados e de consumo de pasta. Sendo assim, a figura 9.14 apresenta a correlação entre a massa específica no estado fresco e o volume de pasta consumido pelas argamassas.



**Figura 8.14 – Correlação entre a massa específica no estado fresco e o volume de pasta consumido pelas argamassas.**

A correlação apresentada no gráfico da figura 8.14 mostra que, no presente trabalho, o volume de pasta consumido pelas argamassas exerceu influência nas massas específicas das mesmas. Como neste estudo foi utilizada a mesma quantidade de aglomerantes em todas as argamassas, o maior consumo de pasta implica em um maior consumo de água, o que conseqüentemente acarreta no decréscimo da massa específica.

## 8.5 EXSUDAÇÃO

A exsudação interfere na trabalhabilidade das argamassas, pois sendo esta a tendência de separação da água de amassamento da argamassa no estado fresco, pode provocar o carregamento de partículas finas exigindo inclusive misturas freqüentes para manter a homogeneidade inicial da argamassa (TRISTÃO, 1995).

Para a realização deste ensaio, o método utilizado foi o MR-6 da RILEM. Esse método prescreve que somente uma leitura de volume de água exsudada seja feita em cada uma das cinco amostras. Desta forma, foi utilizada uma amostra para cada leitura nos tempos de 15, 30, 60, 120 e 240 minutos.

Foram feitas duas modificações no procedimento prescrito pela norma:

- 1) Os béqueres de 600ml de capacidade volumétrica, sugeridos pela norma como recipiente onde as argamassas permanecem em repouso até o momento da leitura, foram substituídos por recipientes retangulares de



vidro de dimensões médias 20x14x10cm (comprimento, largura e altura, como mostra a figura 8.15). Isto possibilitou uma melhor avaliação da exsudação, pois ampliou a superfície livre, como mostra a figura 8.15. Foram marcadas referências nos recipientes indicando a capacidade volumétrica de 500ml, que representa o volume de argamassa, prescrito pela norma, para cada amostra.

- 2) A pipeta graduada, indicada pela norma para retirar a água exsudada da superfície da amostra, foi substituída por uma seringa com agulha. Essa substituição facilitou a coleta da água exsudada.

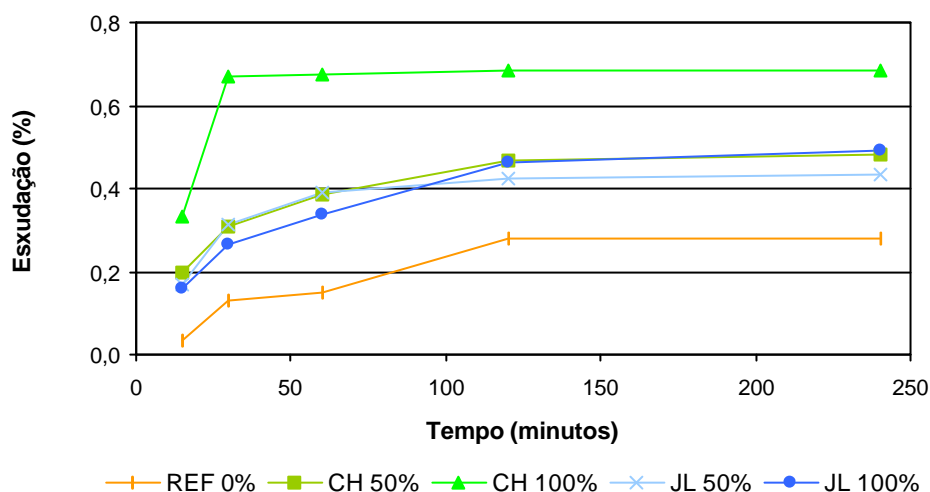


**Figura 8.15 – Ensaio de exsudação.**

Os resultados do ensaio de exsudação foram calculados levando em consideração a água de amassamento. Desta forma, os valores apresentados na tabela 8.7 e na figura 8.16 expressam a porcentagem de água exsudada acumulada, em cada tempo de leitura, em relação à quantidade de água inicial.

**Tabela 8.7 – Volume de água exsudada acumulada em relação ao volume de água inicial.**

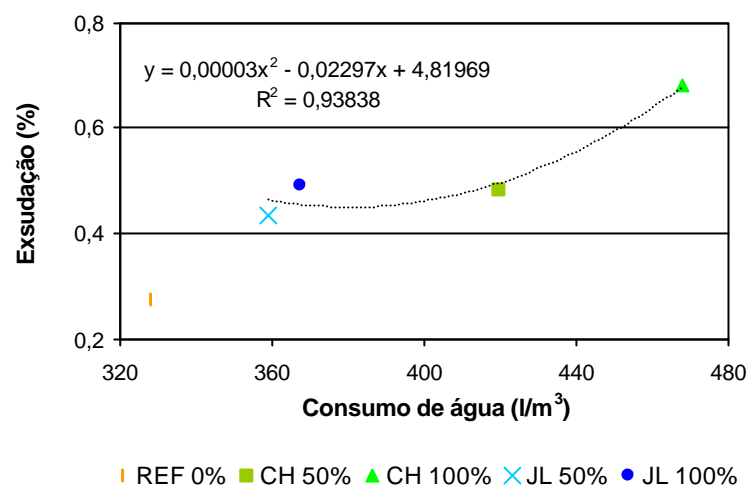
Tempo (min)	Volume de água exsudada em relação à água inicial (%)				
	REF 0%	CH 50%	CH 100%	JL 50%	JL 100%
15	0,03	0,20	0,33	0,17	0,16
30	0,13	0,31	0,67	0,31	0,27
60	0,15	0,39	0,68	0,39	0,34
120	0,28	0,47	0,68	0,42	0,46
240	0,28	0,48	0,68	0,43	0,49



**Figura 8.16 – Variação do volume de água exsudada com o tempo.**

O gráfico da figura 8.16 mostra que a exsudação de água das argamassas ocorre principalmente nas duas primeiras horas, sendo mínima ou até mesmo nula nos tempos superiores a este. Ao analisar a influência da substituição da areia pela cinza pesada observa-se que o aumento da substituição ocasionou o aumento da exsudação, o que contraria os resultados encontrados por LENZI (2001). Os melhores resultados, em relação aos dois tipos de cinzas, foram obtidos pelas argamassas dosadas com as cinzas Jorge Lacerda.

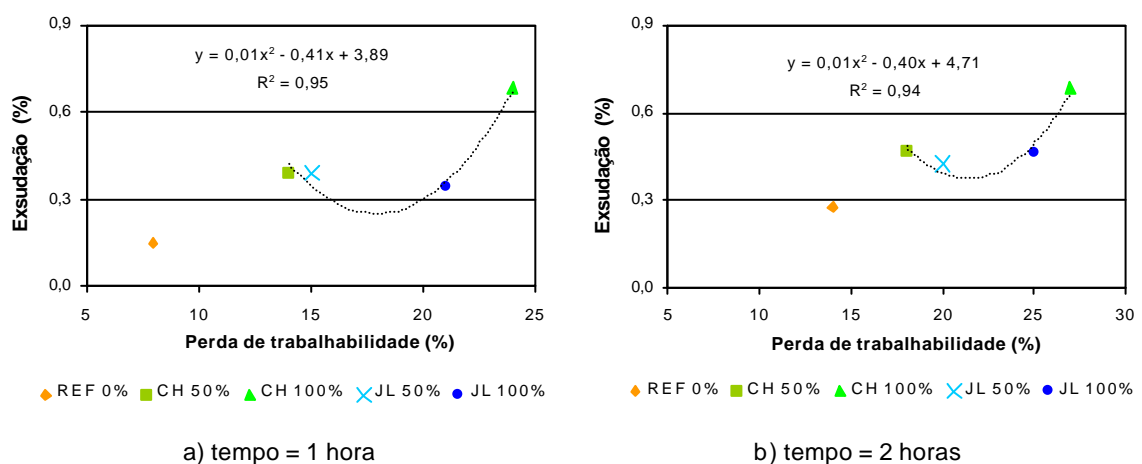
A exsudação pode estar relacionada com a demanda de água de amassamento. Para investigar essa influência, foi feita a correlação entre a exsudação e a quantidade de água consumida por m<sup>3</sup> de argamassa, que é apresentada na figura 8.17.



**Figura 8.17 – Variação da água exsudada com o consumo de água das argamassas.**

Da análise do gráfico da figura 8.17 conclui-se que a quantidade de água inicial (água de amassamento) exerceu influência na exsudação das argamassas investigadas, pois as argamassas que apresentaram maior exsudação (CH 50% e CH 100%) também foram as que exigiram maior demanda d'água.

A homogeneização periódica das argamassas por pedreiros nos canteiros de obra é uma prova de que a exsudação interfere na trabalhabilidade das mesmas. Desta forma, para avaliar as argamassas em estudo, foram feitas correlações entre a perda de trabalhabilidade e a exsudação das argamassas para os tempos de 1 e 2 horas, conforme mostra a figura 8.18.



**Figura 8.18 – Relação entre a exsudação e a perda de trabalhabilidade.**

As correlações encontradas apresentadas na figura 8.18 confirmam a influência da exsudação na trabalhabilidade das argamassas. Também foi comprovada a influência da demanda de água de amassamento na exsudação. Uma saída para diminuir a exsudação sem prejudicar a trabalhabilidade das argamassas seria a utilização de aditivos plastificantes, conforme sugere o estudo de CHENGZI et al (1996).

## 8.6 INÍCIO E FIM DE PEGA

O ensaio de início e fim de pega foi realizado obedecendo aos procedimentos prescritos pela norma de referência NF EM 196-3 (1990) – Détermination du temps de prise des ciments, CERIB fiche 34. Essa norma prescreve a determinação do tempo de pega para pastas de cimento e argamassas, sendo a determinação do tempo de pega das argamassas feita com uma adaptação de um sobrepeso de 700g no aparelho de Vicat (figura 8.19).



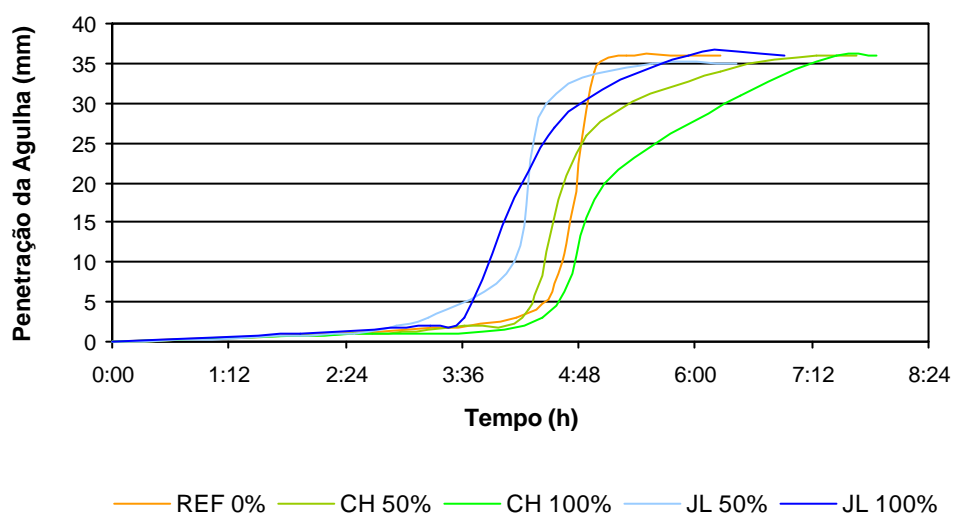
Figura 8.19 – Aparelho de Vicat com sobrepeso para argamassas.

Segundo essa norma, o início de pega acontece quando a distância entre a agulha do aparelho de Vicat e a placa de base do recipiente contendo a argamassa for de  $4\text{mm} \pm 1\text{mm}$ . O fim de pega ocorre quando, após 15 minutos de contato da agulha com a argamassa, não ocorrer penetração superior a 0,5mm.

A tabela 8.8 apresenta os tempos de duração da pega, assim como o início e fim do processo. A figura 8.20 mostra a variação da altura de penetração da agulha do aparelho de Vicat com o tempo.

**Tabela 8.8 – Tempos de início, fim e duração da pega nas argamassas.**

Argamassa	Tempo de pega (h)			Relação água/cimento
	início	fim	duração	
REF 0%	4:10	6:15	2:05	1,90
CH 50%	4:17	7:39	3:22	2,99
CH 100%	4:25	7:52	3:27	3,68
JL 50%	3:15	6:25	3:10	2,09
JL 100%	3:37	6:55	3:18	1,40



**Figura 8.20 – Variação da altura de penetração da agulha com o tempo.**

Como pode ser observada na tabela 8.8, a substituição da areia pelas cinzas pesadas provocou um aumento na duração dos tempos de pega, em relação à argamassa referência (REF 0%), de um pouco mais de 1 hora. O início de pega das argamassas dosadas com as cinzas Jorge Lacerda ocorreu cerca de 1 hora mais cedo em comparação com as outras argamassas, inclusive a de referência.

Ressalta-se que uma das formas de avaliar o efeito das cinzas no tempo de pega seria estabelecer a mesma relação água/cimento para todas as argamassas. Entretanto, seria impossível de se obter um parâmetro de consistência para as argamassas sem a utilização de aditivos plastificantes.

LENZI (2001) atribui o aumento dos tempos de pega ao aumento do teor de carbono incombusto. Os lotes das cinzas de Jorge Lacerda e Charqueadas utilizados apresentam, respectivamente, valores de carbono incombusto iguais a 3,48% e 10,74%. Entretanto, não foi constatada uma diferença significativa na duração dos tempos de pega para as argamassas confeccionadas com os dois tipos de cinza.

## ***9 Propriedades das argamassas no estado endurecido***

---

### **9.1 GENERALIDADES**

Para a realização dos ensaios das argamassas no estado endurecido, os materiais foram proporcionados em massa, utilizando-se balança com precisão de 0,1 g com os traços dos materiais secos definidos no capítulo 8, e o teor de água definido em função da consistência-padrão.

A quantidade de material colocado no misturador foi suficiente para a moldagem de 25 corpos-de-prova cilíndricos, que seriam utilizados em todos os ensaios realizados nas argamassas em estado endurecido. O ensaio de resistência de aderência à tração foi realizado com a argamassa, em estado endurecido, após ser aplicada na superfície de painéis de blocos de concreto com dimensões de 40x40cm<sup>2</sup>.

A moldagem dos corpos-de-prova foi realizada em moldes metálicos cilíndricos de 50mm de diâmetro e 100mm de altura, conforme procedimentos de moldagem estabelecidos na NBR 7215 (1982). Para facilitar a desmoldagem e eliminar o uso do óleo, que poderia vedar os poros da superfície, comprometendo os resultados dos ensaios de absorção de água, o fundo e as paredes internas dos moldes foram revestidos com filme plástico. Colocou-se, na face superior do molde, uma plaqueta de vidro para evitar a evaporação da água da argamassa recém-moldada.

A cura foi realizada mantendo-se inicialmente os corpos-de-prova em ambiente de laboratório por 48 horas, quando foram desmoldados e inseridos em câmara úmida, com umidade relativa superior a 90% e temperatura de 20±5°C, onde permaneceram até a data de realização de cada ensaio.

Os valores individuais, obtidos em cada ensaio, assim com os tratamentos estatísticos efetuados são apresentados no Anexo 1.

## 9.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os corpos-de-prova cilíndricos permaneceram em ambiente de cura até a data de seu rompimento aos 7, 14, 28 e 90 dias de idade.

Na idade de rompimento, os corpos-de-prova foram pesados e foram medidos sua altura e seus diâmetros ortogonais no terço médio da altura, com auxílio de um paquímetro para a determinação da massa específica no estado endurecido.

Em seguida, foram capeados com mistura de enxofre e cimento, em proporção **4 : 1** em volume, nas faces superior e inferior, conforme NBR 7215 (1982), para melhor distribuição dos esforços de rompimento.

Foram rompidos quatro corpos-de-prova de cada argamassa, nas idades de 7, 14, 28 e 90 dias. Para o rompimento, fixou-se a velocidade de deslocamento da mesa da prensa em 0,025 mm/s. O corpo-de-prova era centrado no prato inferior da prensa e sobre ele foi posicionada uma rótula, em que o prato superior, também rotulado, transmitia a carga de compressão.

Os resultados dos rompimentos foram determinados de acordo com o item 5 da NBR 13279 (1995), que prevê um desvio relativo máximo de 6% dos valores individuais para a média das amostras rompidas.

As resistências à compressão das argamassas nas quatro idades estudadas foram agrupadas no gráfico esquematizado na figura 9.1.

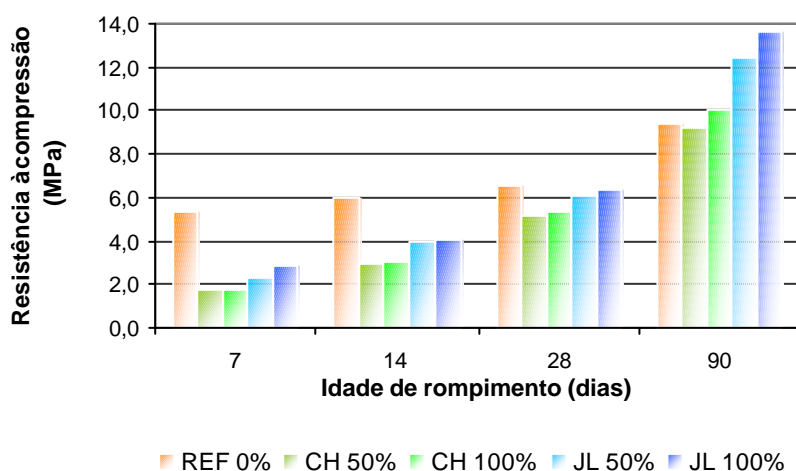


Figura 9.1 – Valores de resistência à compressão nas idades indicadas.



Analisando o gráfico apresentado têm-se as seguintes conclusões:

- i. As argamassas contendo cinzas obtiveram resistência maior que a argamassa de referência somente aos 90 dias de idade, com exceção da argamassa CH 50% cujo valor da resistência nessa idade continuou abaixo do valor obtido pela argamassa referência;
- ii. o melhor desempenho em relação à resistência à compressão foi obtido pela argamassa JL 100%, aos 90 dias de idade. Sendo que as argamassas dosadas com as cinzas Jorge Lacerda atingiram os maiores valores de resistência, em todas as idades, se comparadas às argamassas dosadas com as cinzas Charqueadas.

A figura 9.2 mostra o gráfico dos valores de resistência à compressão das argamassas em relação aos valores obtidos pela argamassa de referência e aos valores da relação água/cimento de cada argamassa.

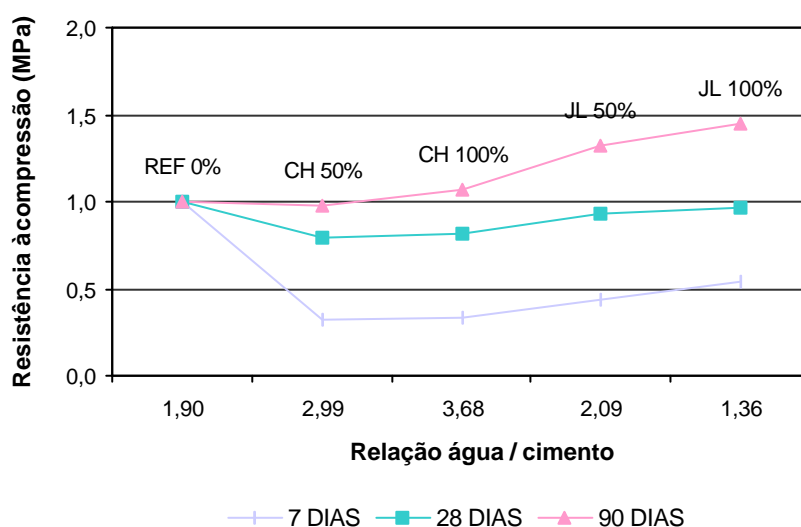


Figura 9.2 – Valores de resistência à compressão em relação ao fator água/cimento.

Ao observar o gráfico apresentado percebe-se que, à medida que a areia é substituída por cinza pesada, aumenta a resistência à compressão das argamassas dosadas com os dois tipos de cinzas. Este fato pode ser explicado pela reação pozolânica das cinzas, principalmente para a idade de 90 dias.

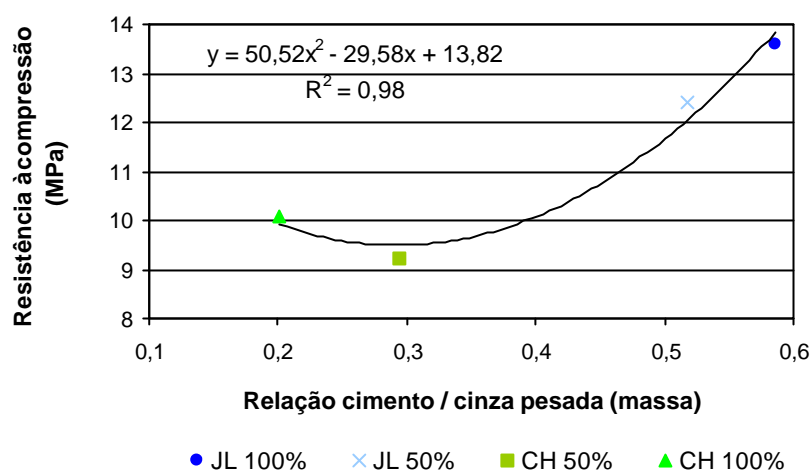


Figura 9.3 – Valores de resistência à compressão em relação ao fator cimento / cinza pesada.

O gráfico apresentado na figura 9.3 mostra que não é possível diferenciar a reação pozolânica dos tipos de cinza utilizados através da resistência à compressão, pois a relação cimento / cinza pesada das argamassas dosadas com as cinzas Jorge Lacerda é maior, influenciando os valores de resistência atingidos.

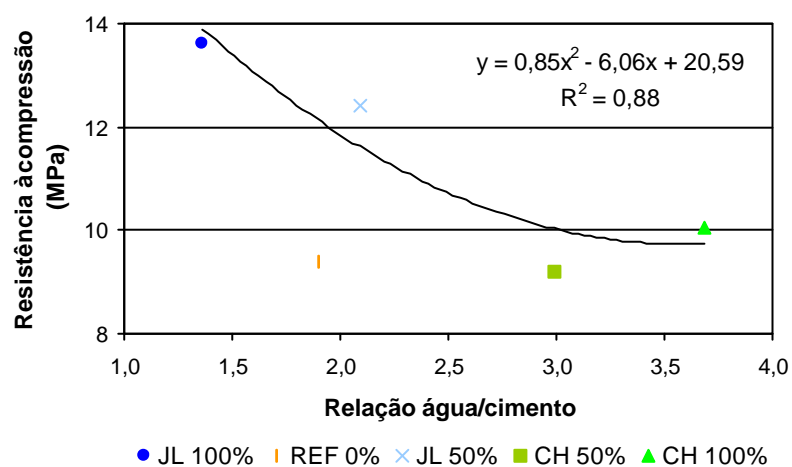


Figura 9.4 – Valores de resistência à compressão em relação ao fator água/cimento.

A correlação apresentada na figura 9.4 evidencia a influência do fator água cimento na resistência das argamassas confeccionadas com cinzas pesadas. Na medida em que ocorreu o aumento da relação água/cimento a resistência à compressão diminuiu.

### 9.3 MASSA ESPECÍFICA

O valor da massa específica da argamassa é um indicativo da compactidade obtida da mistura agregado e aglomerante, além da propiciada pelo endurecimento ao longo do tempo, resultante das reações químicas em curso.

Para a determinação da massa específica das argamassas no estado endurecido foram adotados os procedimentos da NBR 9778 (1987) – Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica. Nesse procedimento, para a saturação do corpo-de-prova foi usada a imersão em água à temperatura de  $23\pm 2^\circ\text{C}$ .

A tabela 9.1 apresenta os valores das massas específicas encontrados para as argamassas analisadas.

**Tabela 9.1 – Valores das massas específicas no estado endurecido.**

Traço	ME (g/cm <sup>3</sup> ) seca	ME (g/cm <sup>3</sup> ) saturada	ME (g/cm <sup>3</sup> ) real
REF 0%	1,82	2,08	2,45
CH 50%	1,40	1,82	2,42
CH 100%	1,27	1,72	2,33
JL 50%	1,66	1,91	2,21
JL 100%	1,56	1,82	2,11

As massas específicas foram calculadas através das equações abaixo apresentadas, constantes na norma NBR 9778.

$$ME_{\text{seca}} = \frac{M_s}{M_{\text{sat}} - M_i}$$

**Equação 9.1**

$$ME_{\text{saturada}} = \frac{M_{\text{sat}}}{M_{\text{sat}} - M_i}$$

**Equação 9.2**

$$ME_{\text{real}} = \frac{M_s}{M_s - M_i}$$

**Equação 9.3**

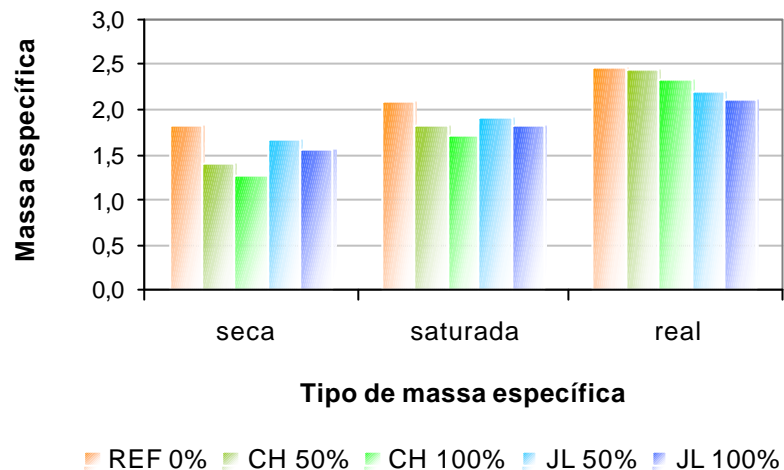
Sendo:

$M_s$  = massa da amostra seca em estufa por 72 horas;

$M_{sat}$  = massa da amostra após imersão em água por 72 horas;

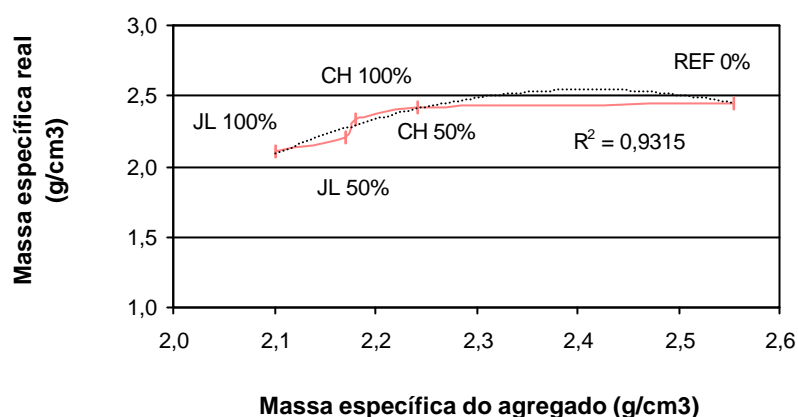
$M_i$  = massa da amostra imersa em água, medida por balança hidrostática, após saturação em água por 72 horas.

A figura 9.5 apresenta o gráfico com os valores das massas específicas para cada argamassa.



**Figura 9.5 – Valores das massas específicas no estado endurecido.**

Os valores da massa específica real obtiveram uma boa correlação com as massas específicas dos agregados compostos de cada argamassa, conforme mostra a figura 9.6.



**Figura 9.6 – Correlação entre os valores da massa específica real (estado endurecido) e os valores da massa específica dos agregados.**

Os valores da massa específica real, apresentam um visível decréscimo com a incorporação de cinzas pesadas, cuja tendência é justificada pela diferença existente entre os valores médios das massas específicas das frações dos materiais utilizados: areia ( $ME = 2,64\text{g/cm}^3$ ), cinzas CH ( $ME = 2,18\text{g/cm}^3$ ) e cinzas JL ( $ME = 1,70\text{g/cm}^3$ ).

## 9.4 ÍNDICE DE VAZIOS

O ensaio para a determinação do índice de vazios foi executado concomitantemente ao ensaio de massa específica no estado endurecido, conforme procedimentos da NBR 9778 (1987). Para a execução do mesmo foi utilizado o procedimento de imersão em água à temperatura de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$ , e uma balança com precisão de 0,001 g.

O índice de vazios das argamassas no estado endurecido é a relação entre o volume de poros permeáveis e o volume total da amostra. Neste estudo, o índice de vazios foi determinado para amostras com 82 dias de cura, mais três dias secando em estufa. Os índices de vazios de todas as argamassas analisadas estão apresentados na figura 9.7.

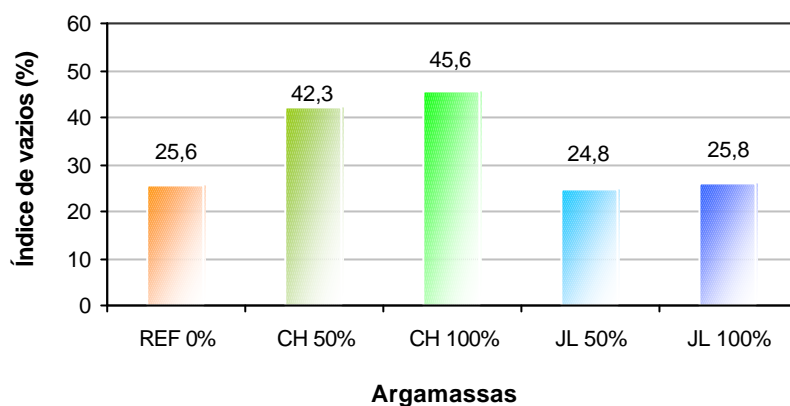


Figura 9.7 – Índices de vazios das argamassas no estado endurecido.

Conforme dados de literatura, um dos principais fatores que podem influenciar o índice de vazios de uma argamassa no estado endurecido é o teor de água, envolvendo relação água/materiais secos, exsudação e retenção de água. Isto porque o teor de água dá idéia dos vazios que ficarão na argamassa endurecida após a evaporação da água capilar ou livre e a água adsorvida. Como pode ser observado na figura 9.7, as argamassas confeccionadas com as cinzas Charqueadas apresentaram o maior índice de vazios, sendo também as que exigiram maior demanda de água.

Como o teor de água está relacionado ao índice de vazios presentes nos agregados, foi verificada a influência deste no índice de vazios das argamassas no estado endurecido (figura 9.8)

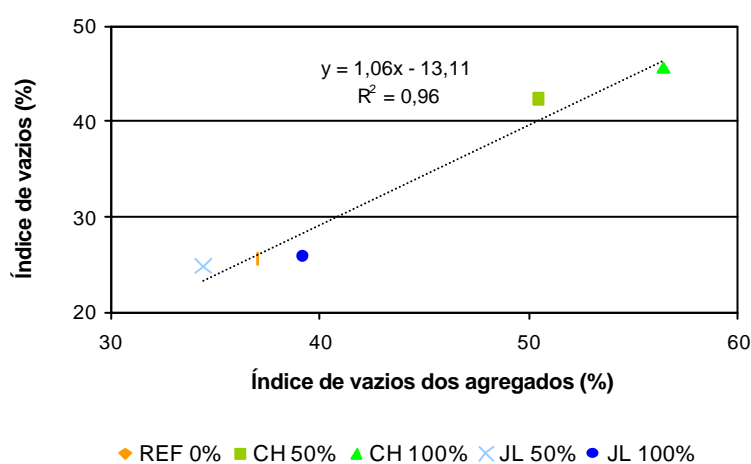
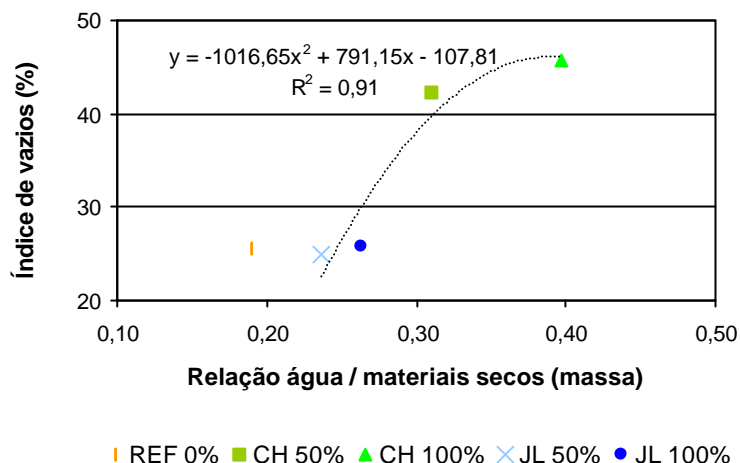


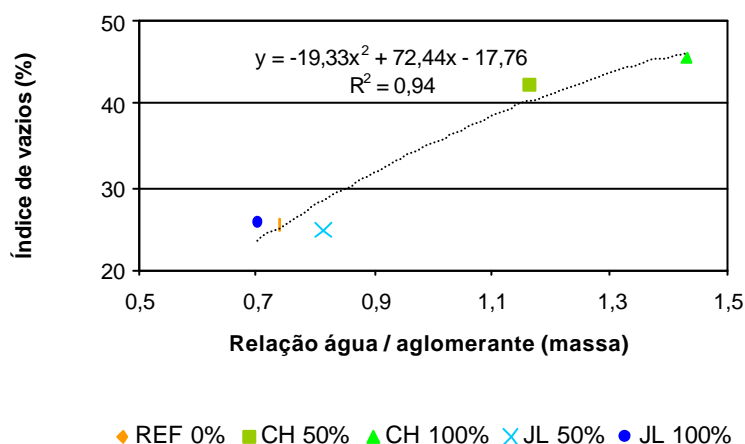
Figura 9.8 – Correlação entre o índice de vazios no estado endurecido e o índice de vazios dos agregados.

Percebe-se, pelo valor de  $R^2$  apresentado no gráfico, que estes dois fatores estão bem interligados, ressaltando a importância de um bom fator de empacotamento, indicado pelo decréscimo do índice de vazios dos agregados, e da granulometria do agregado no desempenho das argamassas.



**Figura 9.9 – Correlação entre o índice de vazios no estado endurecido e a relação água / materiais secos.**

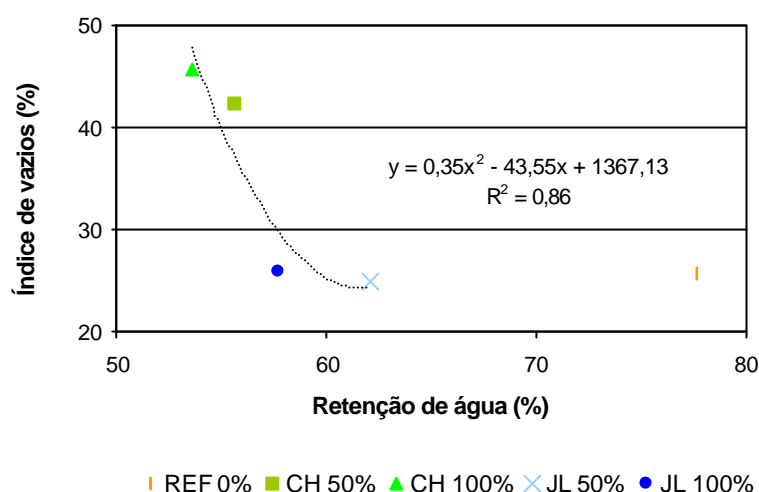
A correlação obtida no gráfico da figura 9.9 confirma a influência da relação água / materiais secos no índice de vazios no estado endurecido, pois quanto menor esta relação, menor o índice de vazios no estado endurecido.



**Figura 9.10 – Correlação entre o índice de vazios no estado endurecido e a relação água / aglomerante em massa.**

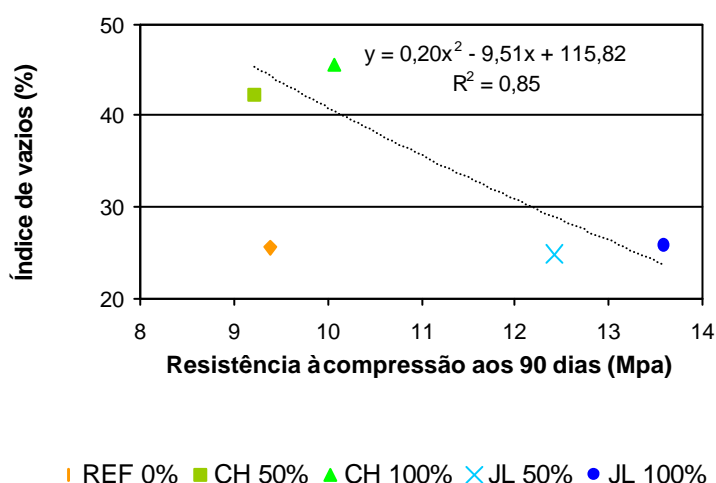
A figura 9.10 mostra que o índice de vazios no estado endurecido também possui uma boa correlação com a relação, em massa, água / aglomerante. Esse resultado é

bem admissível, pois uma maior quantidade de água de amassamento tende a gerar uma maior quantidade de vazios na argamassa endurecida; já uma maior quantidade de aglomerante, após a hidratação, é responsável pelo preenchimento de poros permeáveis. Desta forma, quanto menor a relação água / aglomerante, menor será o índice de vazios na argamassa endurecida.



**Figura 9.11– Correlação entre o índice de vazios no estado endurecido e a retenção de água no estado fresco.**

O gráfico apresentado mostra que quanto maior a retenção de água das argamassas no estado fresco, menor a quantidade de vazios no estado endurecido, confirmando os dados obtidos em literatura. Não foi encontrada uma boa correlação entre o índice de vazios e a exsudação para as argamassas avaliadas neste trabalho.



**Figura 9.12 – Correlação entre o índice de vazios no estado endurecido e a resistência à compressão das argamassas.**



A influência dos índices de vazios na resistência à compressão pode ser observada através da figura 9.12. Desta avaliação, conclui-se que o aumento do índice de vazios no estado endurecido é um dos responsáveis pelo decréscimo da resistência à compressão das argamassas.

Mais uma vez as argamassas dosadas com as cinzas Jorge Lacerda apresentaram melhor desempenho em relação às dosadas com as cinzas Charqueadas.

## 9.5 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO

Os procedimentos utilizados neste ensaio foram os descritos pela NBR 9778 (1987) – Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica.

Este ensaio foi executado em amostras nas quais os procedimentos e os resultados encontrados serviram de base para a definição da absorção, o índice de vazios e a massa específica no estado endurecido.

A figura 9.13 apresenta um gráfico mostrando a evolução da absorção de água por imersão através do tempo.

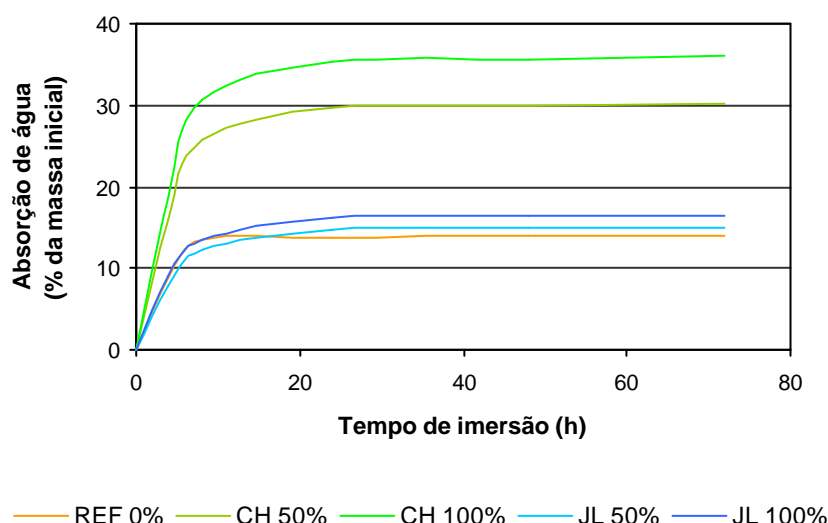
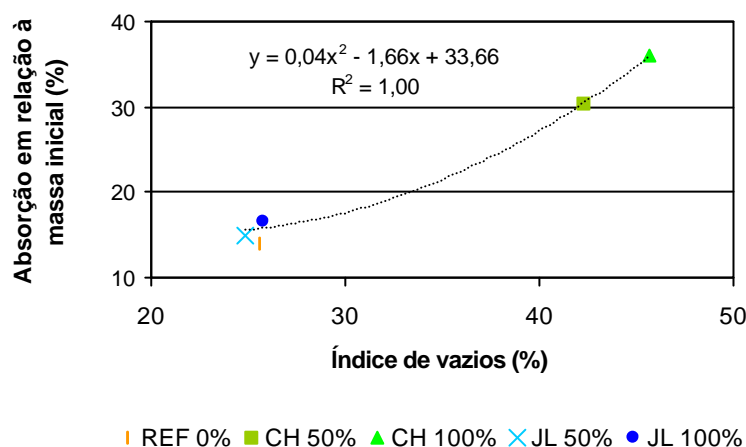


Figura 9.13 – Resultados da absorção de água por imersão através do tempo.

Ao observar este gráfico percebe-se que a absorção significativa de água ocorre no tempo de 24 horas, após esse período a absorção é mínima. Na medida em que

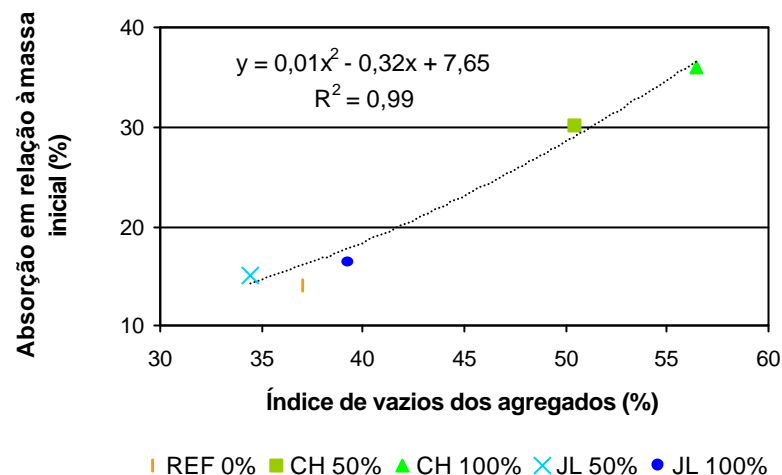
aumentou a substituição da areia pelas cinzas pesadas, aumentou a absorção por imersão das argamassas, confirmando os resultados encontrados por LENZI (2001). As argamassas confeccionadas com as cinzas Charqueadas apresentaram absorção superior a todas as demais

Os resultados de absorção por imersão obtidos, ao final das 72 horas, apresentaram uma boa correlação com o índice de vazios no estado endurecido, como já era de se esperar, e com a porcentagem de vazios existentes nos agregados (figuras 9.14 e 9.15).



**Figura 9.14 – Resultados da absorção de água por imersão em relação ao índice de vazios no estado endurecido.**

A água absorvida irá preencher os poros permeáveis existentes nas argamassas endurecidas. Desta forma, a argamassa que possuir um elevado índice de vazios conseqüentemente terá uma elevada absorção, o que pode ser confirmado pelos resultados das argamassas CH 50% e CH 100%.



**Figura 9.15 – Resultados da absorção de água por imersão em relação à porcentagem de vazios dos agregados.**

Como o índice de vazios dos agregados exerce influência no índice de vazios no estado endurecido, por estar relacionado ao teor de água das argamassas, conseqüentemente também exercerá influência na absorção de água das argamassas. A correlação apresentada na figura 9.15 confirma esta afirmação, ressaltando novamente a importância do fator de empacotamento dos agregados nas propriedades das argamassas.

## 9.6 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

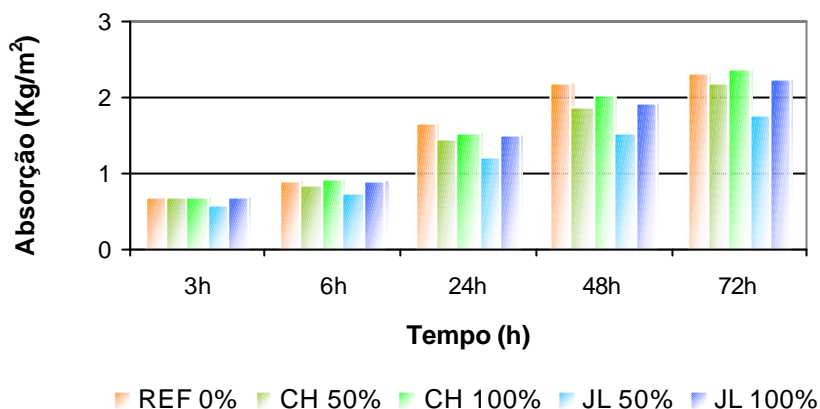
A execução do ensaio de absorção de água por capilaridade obedeceu aos procedimentos descritos na NBR 9779 (1987). Foram utilizadas 3 amostras de cada argamassa com 82 dias de cura, quando estas foram colocadas para secagem em estufa ventilada à temperatura de  $40 \pm 5^\circ\text{C}$  durante 14 dias. Após esse período de secagem, as amostras foram resfriadas em dessecador até a temperatura de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  e tiveram suas massas determinadas.

Os corpos-de-prova foram imersos em água (temperatura de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$ ), sendo mantido constante o nível de  $5 \pm 1$  mm acima da base. O recipiente atendeu aos requisitos da NBR 9779 (1987).

Foram determinadas a massa e a altura da mancha capilar em quatro geratrizes posicionadas ortogonalmente entre si, em intervalos de 3, 6, 24, 48 e 72 horas, contados

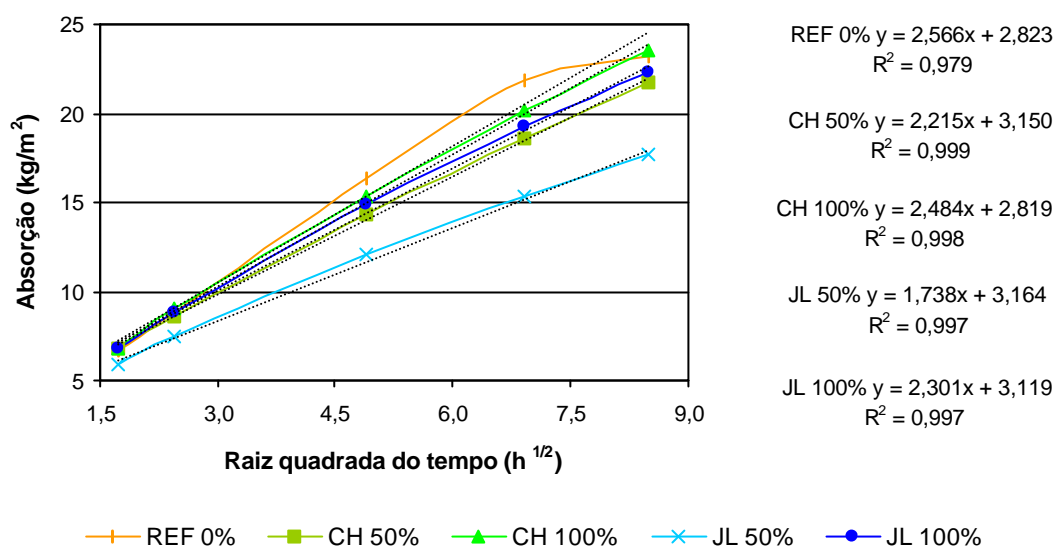
a partir da imersão dos corpos-de-prova (a cada medição, a superfície dos corpos-de-prova era enxugada com toalha absorvente). Após as 72 horas de ensaio, os corpos-de-prova foram rompidos à tração por compressão diametral (NBR 7222, 1983), sendo registradas a distribuição da ascensão capilar no interior do corpo-de-prova.

A figura 9.16 apresenta a evolução da absorção de água por capilaridade com o tempo.



**Figura 9.16 – Absorção de água por capilaridade com o tempo.**

Pode-se observar na figura 9.16 que as amostras da argamassa de referência (REF 0%) foram saturadas em 48h, isto mostra que a adição de cinzas exerce uma influência benéfica na redução dos poros capilares. Vale salientar que os corpos-de-prova ensaiados com 96 dias de cura, e é de conhecimento geral que a permeabilidade das argamassas tende a diminuir com o envelhecimento. Os resultados encontrados por LENZI (2001), que realizou o ensaio de absorção por capilaridade em argamassas com 28 dias, mostraram saturação completa das amostras em apenas 3 horas. No caso deste estudo, além da diferença de idade das amostras ensaiadas, um fator que pode ter influenciado os resultados foi a não otimização granulométrica dos agregados. Para melhor avaliar a absorção por capilaridade das argamassas, foram obtidos os coeficientes de absorção de água (figura 9.17).



**Figura 9.17 – Correlação obtida no ensaio de absorção por capilaridade.**

Através do gráfico da quantidade de água absorvida em relação à raiz quadrada do tempo, obteve-se a correlação linear para todas as argamassas. As equações e coeficientes de correlação estão demonstrados na mesma figura. Ao determinar a inclinação da reta ajustada que passa pelos pontos, são obtidos os coeficientes de absorção de água (tabela 9.2), mostrados no gráfico como fatores de multiplicação da variável x das equações das retas.

Da análise dos gráficos apresentados anteriormente, conclui-se que o aumento da substituição da areia por cinza pesada provocou um aumento da absorção por capilaridade. Nesta propriedade as argamassas contendo cinzas Jorge Lacerda também apresentaram melhor desempenho se comparadas às argamassas contendo cinzas Charqueadas em relação aos mesmos teores de substituição.

**Tabela 9.2 – Coeficientes de absorção das argamassas.**

Argamassa	Coeficiente de absorção
REF 0%	2,566
CH 50%	2,215
CH 100%	2,484
JL 50%	1,738
JL 100%	2,301

Os valores apresentados na tabela 9.2 mostram que os melhores coeficientes de absorção foram obtidos pelas argamassas dosadas com as cinzas Jorge Lacerda, sendo o pior valor o da argamassa de referência. Para os dois tipos de cinzas avaliados, a substituição de 50% proporcionou menores coeficientes de absorção em relação à substituição de 100%. Isto pode ser explicado pela reação pozolânica das cinzas quando a substituição da areia é menor, na medida em que os teores de substituição aumentam, as reações pozolânicas continuam acontecendo, mas a absorção pode ser prejudicada pelo efeito *filler* das cinzas.

Outro dado importante na avaliação dos resultados de absorção por capilaridade é a mancha deixada pela água absorvida nos corpos-de-prova submetidos a este ensaio. A partir desta mancha é possível identificar a forma de absorção e ascensão da água nas amostras.

Para acompanhar a evolução da mancha de água nas amostras, foram traçadas, em cada uma, quatro retas ortogonais em relação ao diâmetro, acompanhando a altura dos corpos-de-prova. No momento da pesagem dos corpos-de-prova as alturas da mancha foram marcadas, sendo a evolução das manchas de água obtida através dos valores médios das alturas de água indicadas nas quatro geratrizes. O gráfico apresentado na figura 9.18 mostra o valor médio da evolução das manchas d'água de 3 amostras para cada argamassa.

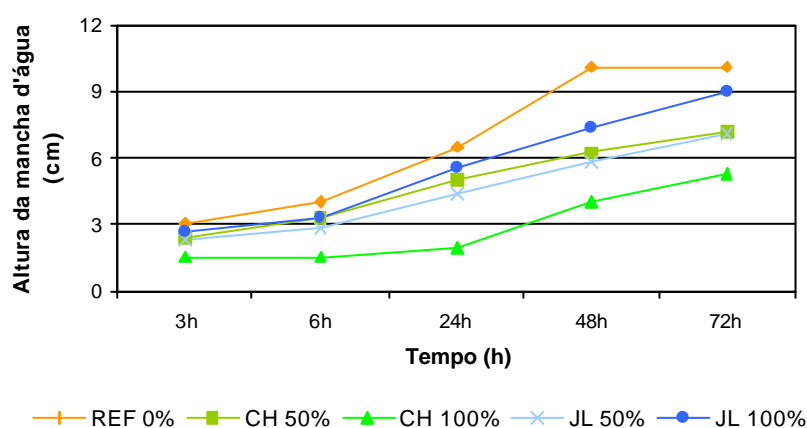


Figura 9.18 – Evolução da mancha de água das amostras submetidas à absorção por capilaridade.

Pode ser observado através do gráfico que, apesar de ser a argamassa que obteve maior absorção de água entre as argamassas dosadas com cinzas, a argamassa

CH 100% apresentou os menores valores de ascensão capilar. O mesmo fato pode ser observado na argamassa CH 50% que teve uma absorção maior que a argamassa JL 100% e apresentou uma ascensão capilar menor. Isto leva à conclusão que as cinzas Charqueadas apresentam grãos com maior porosidade dos que os grãos das cinzas Jorge Lacerda. Desta forma, constatou-se que este ensaio não é o mais adequado para medir a capilaridade em argamassas compostas por agregados porosos.

A figura 9.19 apresenta a mancha de água nos corpos-de-prova rompidos à compressão diametral.



Figura 9.19 – Mancha d'água após 72 horas de absorção por capilaridade.

## 9.7 ADERÊNCIA À TRAÇÃO

O procedimento de ensaio obedeceu às prescrições da NBR 13528 (1995) – Revestimentos de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Determinação da resistência de aderência à tração.

No ensaio de aderência à tração, a argamassa foi aplicada sobre um painel (40 x 40 cm<sup>2</sup>) de blocos de concreto com idade superior a um ano de hidratação, sem a camada de chapisco. A camada de revestimento de argamassa foi aplicada com espessura de 1,5 cm.

Para o arrancamento por tração, foram utilizados corpos-de-prova cilíndricos com 50 mm de diâmetro, sendo adotada a taxa de carregamento de 5 N/s. O arrancamento foi

feito por um equipamento de tração hidráulica (figura 9.20), e os dados foram obtidos por meio de dispositivo digital para leitura de carga.



**Figura 9.20** – Aparelho utilizado para o ensaio de resistência de aderência à tração.

Os resultados dos ensaios de aderência à tração apresentaram elevado coeficiente de variação, este fato somado ao grande número de amostras de todas as argamassas que foram inutilizadas pelo aparelho antes mesmo do início da tração, sugere que este equipamento pode não ser o mais adequado para determinar a resistência à tração em argamassas. Sendo assim, optou-se por apresentar os resultados (tabela 9.3) em duas formas, tal qual coletados e estatisticamente tratados. O tratamento estatístico consistiu em eliminar valores espúrios até o limite mínimo de três amostras ou até alcançar coeficiente de variação inferior a 10%.



**Tabela 9.3 – Resistência de aderência à tração com os respectivos coeficientes de variação.**

Argamassa	Sem tratamento estatístico			Com tratamento estatístico		
	Número de amostras	Resistência média de aderência à tração (MPa)	Coeficiente de variação (%)	Número de amostras	Resistência média de aderência à tração (MPa)	Coeficiente de variação (%)
REF 0%	7	0,296	25	3	0,344	7
CH 50%	6	0,103	33	3	0,076	7
CH 100%	7	0,141	38	3	0,191	3
JL 50%	6	0,206	37	3	0,220	9
JL 100%	5	0,161	37	4	0,135	7

A tabela 9.4 apresenta as formas de ruptura predominantes nas amostras.

**Tabela 9.4 – Forma de ruptura das amostras submetidas ao ensaio de resistência de aderência à tração.**

Argamassa	Resistência média de aderência à tração (MPa)	Forma de ruptura das amostras (%)	
		A	B
CH 50%	0,076	100	0
JL 100%	0,135	100	0
CH 100%	0,191	33	67
JL 50%	0,220	33	67
REF 0%	0,344	33	67

Sendo as formas de ruptura identificadas pela NBR 13528 como:

- A. Ruptura na interface argamassa / substrato
- B. Ruptura na argamassa de revestimento
- C. Ruptura no substrato
- D. Ruptura na interface revestimento / cola
- E. Ruptura na interface cola / pastilha.

Ao analisar a forma de ruptura das amostras foi observado que as argamassas CH 50% e JL 100%, que tiveram as menores médias de resistência de aderência à tração, após o tratamento estatístico, apresentaram totalidade das amostras com ruptura na interface revestimento/substrato. Essa forma de ruptura é identificada pela NBR 13528 (1995) pela letra “A”, onde o valor da resistência de aderência à tração é igual ao obtido no ensaio.

Já as argamassas restantes (CH 100% , JL 50% e REF 0%) que tiveram médias de resistência de aderência à tração superiores, após o tratamento estatístico, apresentaram a maior parte das amostras com ruptura da argamassa de revestimento. Essa forma de ruptura é identificada pela NBR 13528 (1995) pela letra “B”, onde o valor da resistência de aderência à tração é maior que o obtido no ensaio.

PARTE I – Introdução e dados de literatura

PARTE II – Procedimento experimental

PARTE III – Análise dos dados coletados

**PARTE IV – Conclusões e Recomendações**

PARTE V – Bibliografia e anexos

## 10 Conclusões

---

O objetivo desta pesquisa foi o de elaborar uma metodologia para a formulação de uma dosagem para argamassas de revestimento, através de curvas granulométricas, com a incorporação das cinzas provenientes da combustão do carvão pulverizado.

Através do modelo matemático proposto por FURNAS (1931), foi gerada uma curva granulométrica teórica. Esta curva definiu a distribuição granulométrica dos agregados e dos aglomerantes, cujas proporções obedeceram ao traço **1:2:9** em volume. Foram confeccionadas argamassas com substituição da areia por cinza pesada nos teores 0%, 50% e 100%, utilizando cinzas provenientes de dois processos termelétricos diferentes, o que compõe um total de cinco argamassas.

Foram avaliadas as propriedades das argamassas confeccionadas nos estados fresco e endurecido. A partir da análise dos dados obtidos, chegou-se às seguintes respostas para as hipóteses deste trabalho:

**Hipótese 1** : *A incorporação das cinzas pesadas em substituição à areia nas argamassas realmente pode ser otimizada pela análise da composição granulométrica dos componentes (aglomerantes e agregados) através de curvas granulométricas.*

Como já foi dito anteriormente, o princípio para a composição e dosagem de uma argamassa com base na curva granulométrica está em obter uma argamassa trabalhável no estado fresco e que possua, no estado endurecido, uma compacidade elevada, com redução do volume de vazios.

Os resultados obtidos pelas argamassas estudadas, apresentados na tabela 10.1, são considerados satisfatórios em relação aos resultados encontrados em dados de literatura. Estes resultados podem confirmar a hipótese citada acima, pois a incorporação das cinzas pesadas, em substituição à areia nas argamassas, realmente pode ser otimizada pela composição granulométrica dos componentes (agregados e aglomerantes) através da curva granulométrica gerada pela metodologia.

**Tabela 10.1 – Comparação dos resultados obtidos com os resultados de LENZI (2001).**

Propriedades	Substituições	Resultados obtidos
Relação a/c (massa)	CH 50%	2,99
	CH 100%	3,68
	JL 50%	2,09
	JL 100%	1,40
Resistência à compressão aos 90 dias (MPa)	CH 50%	9,21
	CH 100%	10,06
	JL 50%	12,41
	JL 100%	13,59
Índice de vazios no estado endurecido (%)	CH 50%	42,3
	CH 100%	45,6
	JL 50%	24,8
	JL 100%	25,8

**Hipótese 2:** A distribuição granulométrica contínua, conforme modelo desenvolvido por FURNAS (1931), é uma das maneiras de se obter uma argamassa com a máxima compacidade, redução do consumo de aglomerante e da água de amassamento para uma trabalhabilidade desejada.

A aplicação da distribuição granulométrica contínua, conforme modelo desenvolvido por FURNAS (1931), proporcionou bons resultados para as argamassas investigadas. Estes resultados incluíram uma boa trabalhabilidade mesmo com a redução na demanda de água, o aumento da compacidade, altas resistências à compressão e baixa absorção.

O desenvolvimento da curva granulométrica teórica permite avaliar a previsão do consumo de aglomerantes quando as cinzas da queima do carvão mineral, oriundas de diferentes processos, são utilizadas como substituição às areias naturais. Este princípio constitui um importante procedimento para a otimização de dosagem em processo de industrialização de argamassas de revestimento.

**Hipótese 3:** As cinzas oriundas de diferentes processos termelétricos apresentam comportamento diferenciado quando usadas na composição de argamassas em substituição à areia.

As análises das propriedades das argamassas nos estados fresco e endurecido, apresentadas nos capítulos 8 e 9, mostraram que as argamassas confeccionadas com as cinzas provenientes do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda apresentaram melhor desempenho em relação às argamassas confeccionadas com as cinzas provenientes da Usina Termelétrica de Charqueadas. Confirmando que as cinzas oriundas de diferentes processos termelétricos apresentam comportamento diferenciado quando usadas na composição de argamassas em substituição à areia.

***Hipótese 4: A cinza pesada possui características minerais satisfatórias.***

As análises das propriedades das argamassas nos estados fresco e endurecido, apresentadas nos capítulos 8 e 9, mostraram que as argamassas confeccionadas tanto com as cinzas provenientes do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda quanto com as cinzas provenientes da Usina Termelétrica de Charqueadas apresentaram desempenhos satisfatórios, se comparados com os dados de literatura. Isto confirma que a cinza pesada, mesmo proveniente de processos termelétricos distintos possui características minerais satisfatórias.

## ***11 Recomendações para trabalhos futuros***

---

Com a experiência adquirida no decorrer da pesquisa, observou-se alguns aspectos importantes que poderão orientar novas pesquisas nesta área de conhecimento. Tais aspectos estão descritos abaixo:

- ✓ Os patamares de resistência à compressão alcançados com a otimização granulométrica das argamassas dosadas com a substituição da areia pela cinza pesada permitem a redução dos teores de cimento nessas argamassas. Para tanto, esta pesquisa auxilia, através dos dados aqui expostos, a estruturação de novas pesquisas que investiguem a redução dos teores de aglomerantes.
- ✓ Devido à grande influência dos teores de água exigidos pelas argamassas dosadas com cinzas, é sugerida a pesquisa dos mesmos traços aqui definidos com a utilização de aditivos plastificantes, que possam ser utilizados em misturas secas, visando à redução ainda maior da relação água/cimento, fator que também pode auxiliar na investigação da redução do consumo de cimento.
- ✓ A avaliação da reatividade pozolânica, de forma isolada, de cada fração presente nas cinzas empregadas pode ser um importante fator na otimização do consumo de cimento.
- ✓ Por se tratar de um produto com a utilização de matéria-prima alternativa, a avaliação de durabilidade e desempenho das argamassas por processos de envelhecimento pode ser um dos fatores preponderantes para reafirmar a viabilidade de uso das argamassas dosadas com incorporação das cinzas.

**PARTE I – Introdução e dados de literatura**

**PARTE II – Procedimento experimental**

**PARTE III – Análise dos dados coletados**

**PARTE IV – Conclusões e Recomendações**

**PARTE V – Bibliografia e anexos**



## ***Referências bibliográficas***

---

ANDEREGG, F. O. (1931)– **Grading aggregates II – The application of mathematical formulas to mortars**. Industrial and Engineering Chemistry. Vol 23, n º 9, p. 1058-1064.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – Standart specification for coal fly ash and raw of calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in Portland cement concrete: **ASTM C618**. Philadelphia, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – Peneiras para Ensaio com Telas de Tecido Metálico, **NBR 5734**. Rio de Janeiro, 1988

\_\_\_\_. Cal hidratada para argamassas, **NBR 7175**. Rio de Janeiro, 1992.

\_\_\_\_. Revestimentos de paredes e tetos com argamassas: materiais, preparo, aplicação e manutenção, **NBR 7200**. Rio de Janeiro, 1982.

\_\_\_\_. Agregado para concreto, **NBR 7211**. Rio de Janeiro, 1983.

\_\_\_\_. Ensaio de cimento Portland, **NBR 7215**. Rio de Janeiro, 1982.

\_\_\_\_. Agregados – Determinação da Composição Granulométrica, **NBR 7217**. Rio de Janeiro, 1987.

\_\_\_\_. Argamassas e concretos – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos, **NBR 7222**. Rio de Janeiro, 1983.

- \_\_\_\_. Agregado em estado solto – Determinação da massa unitária, **NBR 7251**. Rio de Janeiro, 1982.
- \_\_\_\_. Agregado em estado compactado seco – Determinação da massa unitária, **NBR 7810**. Rio de Janeiro, 1983.
- \_\_\_\_. Argamassa de assentamento para alvenaria de blocos de concreto – Determinação da retenção de água, **NBR 9287**. Rio de Janeiro, 1986.
- \_\_\_\_. Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica, **NBR 9778**. Rio de Janeiro, 1987.
- \_\_\_\_. Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade, **NBR 9779**. Rio de Janeiro, 1987.
- \_\_\_\_. Materiais Pozolânicos – Especificações, **NBR 12653**. Rio de Janeiro, 1994.
- \_\_\_\_. Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – Determinação do teor de água para obtenção do índice de consistência-padrão, **NBR 13276**. Rio de Janeiro, 1995.
- \_\_\_\_. Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado, **NBR 13278**. Rio de Janeiro, 1995.
- \_\_\_\_. Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à compressão, **NBR 13279**. Rio de Janeiro, 1995.
- \_\_\_\_. Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Determinação da resistência de aderência à tração, **NBR 13528**. Rio de Janeiro, 1995.
- CAPUTO, H. P. (1988) – **Mecânica dos solos e suas aplicações – Fundamentos**. 6ª edição. Rio de Janeiro, LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora, volume 1.

- CARASEK, H.; DJANIKIAN, J. G. (1993) – **Avaliação da trabalhabilidade para argamassas de assentamento e revestimento.** In: Congresso Brasileiro de Cimento, ABCP, São Paulo. Anais p. 407-426.
- CARNEIRO, A. M. P. (1999) – **Contribuição ao estudo da influência do agregado nas propriedades de argamassas compostas a partir de curvas granulométricas.** São Paulo. (Tese de Doutorado apresentada à Escola Politécnica da USP).
- CHENGZI, Z.; AIQIN, W; MINGSHU, T. (1996) – **The filling role of pozzolanic material.** Cement and Concrete Research, volume 26, nº 6, p. 943-947. Elsevier Science Ltd.
- CHERIAF, M.; ROCHA, J. C. (1997) – **Caracterização dos resíduos industriais do estado de Santa Catarina e as possibilidades de valorização na construção civil.** In: I Encontro nacional sobre edificações e comunidades sustentáveis. Anais, volume único, pg 81a 86, Canela – RS.
- CHERIAF, M. ; ROCHA, J. C.; PÉRA, J. (1999) – **Pozzolanic properties of pulverized coal combustion bottom ash.** Cement and Concrete Research, volume 29, nº 9, p 1387-1391. Elsevier Science Ltd.
- CINCOTTO, M. A., CARNEIRO, A. M. P. (1999) – **Estudo da influência da distribuição granulométrica nas propriedades de argamassas dosadas por curva granulométrica.** In: III Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas. Vitória – ES. Anais, p 3-26.
- CINCOTTO, M. A.; CARASEK, H.; SILVA, M. A. C. (1995) – **Argamassas de revestimento: características, propriedades e métodos de ensaio.** São Paulo: Instituto de pesquisas tecnológicas. Boletim 68 – Publicação IPT 2378.
- ERDOGDU, K.; TÜRKER, P. (1999) – **Effects of fly ash particle size on strength of Portland cement fly ash mortars.** Cement and Concrete Research, volume 28, nº 9, p 1217-1222. Elsevier Science Ltd.

- FURNAS, C. C. (1931) – **Grading aggregates I – Mathematical relations for beds of broken solids of maximum density**. Industrial and Engineering Chemistry. Vol 23, n<sup>o</sup> 9, p. 1052-1058.
- GOTHE, C. A. (1990) – **Sistemas de controle e disposição final das cinzas do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda – SC e da Usina Termelétrica de Jacuí – RS**. In: I Seminário de estudos da aplicação dos resíduos de carvão mineral. Anais, 1<sup>o</sup> painel, Florianópolis.
- HANEHARA S., TOMOSAWA F., KOBAYAKAWA M., HWANG K. (2001) – **Effects of water/powder ratio, Mixing Ratio of Fly Ash, and Curing Temperature on Pozzolanic Reaction of Fly Ash in Cement Paste**. Cement and Concrete Research, volume 31, p. 31-39. Elsevier Science Ltd.
- KIATTIKOMOL, K.; JUTARAPITAKKUL, C.; SONGPIRIYAKIJ, S.; CHUTUBTIM, S. (2001) – **A study of ground coarse fly ashes with different finenesses from various sources as pozzolanic materials**. Cement and Concrete Composites, volume 23, p. 335-343. Elsevier Science Ltd.
- KOLAY P. K., SINGH D. N. (2001) – **Physical, Chemical, Mineralogical, and Thermal Properties of Cenospheres From An Ash Lagoon**. Cement and Concrete Research, volume 31, p. 539-542. Elsevier Science Ltd.
- LENZI, J. L. (2001) – **Influência do uso de cinzas da combustão de carvão mineral em argamassas de revestimento**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil pelo Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Catarina. 155 páginas.
- MALHOTRA V. M., MEHTA P. K. (1996) – **Pozzolanic and Cementitious Materials. Advances in Concrete Technology**. Vol 1, 191 páginas. Ottawa, Canadá.
- METHA, P. K.; MOTEIRO, P. J. M. (1994) – **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo, Editora Pini, 1<sup>a</sup> edição.

NF EM 196-3 (1990) – **Détermination du temps de prise des ciments**, Memento CERIB  
fiche 34.

PARTON, G. M.; SHARIATMADARI, A. A.; HANSOM. (1989) – **Efficiency in aggregate mix design: a 'least squares' method**. The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, Volume 11, número 3.

PAYÁ, J.; BORRACHERO, M. V.; MONZÓ, J.; PERIS-MORA, E.; AMAHJOUR, F. (2001) – **Enhanced conductivity measurement techniques for evaluation of fly ash pozzolanic activity**. Cement and Concrete Research, volume 31, p 41-49. Elsevier Science Ltd.

PIAZZA, J. L.; RUI, V. (1999) – **Comportamento das cinzas pesadas de carvão mineral como substituto da areia quartzosa em argamassas**. In: III Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas. Vitória – ES. Anais, p 389-401.

POZZOBON, C. E. (1999) – **Aplicações tecnológicas para a cinza do carvão mineral produzida no Complexo Termelétrico Jorge Lacerda**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil pelo Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Catarina. 113 páginas.

RANGANATH, R. V.; BHATTACHARJEE, B.; KRISHNAMOORTHY, S. (1998) – **Influence of Size Fraction of Pondered Ash on Its Pozzolanic Activity**. Cement and Concrete Research, Vol 28, nº 5, p. 746–761. Elsevier Science Ltd.

RAO, A. G. (2001) – **Influence of sílica fume on long-term strength of mortars containing different aggregate fractions**. Cement and Concrete Research, Vol 31, p. 7–12. Elsevier Science Ltd.

RÉUNION INTERNACIONAL DES LABORATOIRES D'ESSAIS ET MATERIAUX (1982) – RILEM. **Tendency of water to separate from mortars (bleeding)**. MR-6 (TC13-MR), Paris.

- RISSATO, A. O.; SOUZA, M. L. V. D. (1985) – **Utilização das cinzas de carvão – uma revisão**. In: I Encontro de pesquisadores de carvão no Rio Grande do Sul. Anais, p. 197-206. Porto Alegre, CIENTEC.
- ROCHA, J. C.; MALIK, C.; POZZOBON, C.; MAIA, M. S.; MAGRI, L.; XAVIER, S. M. T. (1999) – **Reaproveitamento das cinzas pesadas do Complexo Jorge Lacerda na elaboração de materiais de construção: aspectos tecnológicos e ambientais**. In: XV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Foz do Iguaçu – Paraná.
- SELMO, S. M. S. (1986) – **Agregados miúdos para argamassas de revestimento**. In: Anais I Simpósio Nacional de Agregados – EPUSP, São Paulo.
- SELMO, S. M. S. (1989) – **Dosagem de argamassas de cimento Portland e cal para revestimento externo de fachada de edifícios**. Dissertação de Mestrado apresentada à EPUSP/DECC, São Paulo, 187 pág.
- SILVA N. I. W. J. R., CHIES F., ZWONOK O. (1997) – **Uso de Cinzas de Carvão na Construção Civil**. In: I Encontro Nacional Sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis, *Anais*. Canela – RS. p. 15-20.
- SILVA, V. S., LIBÓRIO, J.B.L., SILVA, C. R. (1999) – **Argamassas de revestimento com o emprego de pozolana de argila calcinada**. In: III Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas. *Anais*. Vitória, ANTAC. p. 323-333.
- TRISTÃO, F. A. (1995) – **Influência da composição granulométrica da areia nas propriedades das argamassas de revestimento**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil pelo Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Catarina. 188 páginas.
- XU, A.; SARKAR, S. L.; NILSSON, L. O. (1993) – **Effect of fly ash on the microstructure of cement mortar**. *Materials and Structures*, 26, pages 414-424. RILEM.

## **Anexo 1**

---

Este anexo apresenta os dados de laboratório obtidos em relação aos ensaios:

**Anexo 1A** ..... Resistência à compressão

**Anexo 1B** ..... Absorção de água por imersão,  
índice de vazios e massa específica no estado endurecido.

**Anexo 1C** ..... Absorção por capilaridade.

**Anexo 1D** ..... Resistência de aderência à tração.

## Anexo 1A

São apresentados aqui os valores de **resistência à compressão** de todos os corpos-de-prova ensaiados para cada argamassa, assim como os tratamentos estatísticos efetuados. Os valores destacados nas planilhas representam aqueles que não atenderam à especificação prescrita na NBR 13279, apresentando desvio em relação à média maior que 6%. Esses valores foram excluídos do cálculo da média final.

Resistência à compressão - Argamassa REF 0%						
7 dias						
CP	fbase (mm)	seção (m²)	carga (kN)	resistência (MPa)	média (MPa)	desvio %
1	49,4	0,00192	10,26	5,353	5,360	0,1
2	49,7	0,00194	10,24	5,278		1,5
3	49,3	0,00191	10,40	5,448		1,6
4	49,8	0,00195	11,40	<u>5,853</u>		-
14 dias						
CP	fbase (mm)	seção (m²)	carga (kN)	resistência (MPa)	média (MPa)	desvio %
5	49,5	0,00192	10,84	5,633	5,973	5,7
6	49,9	0,00196	11,74	6,003		0,5
7	49,2	0,00190	11,92	6,270		5,0
8	49,5	0,00192	11,52	5,986		0,2
28 dias						
CP	fbase (mm)	seção (m²)	carga (kN)	resistência (MPa)	média (MPa)	desvio %
9	49,3	0,00191	10,26	<u>5,375</u>	6,579	-
10	49,4	0,00192	12,88	6,720		2,1
11	49,4	0,00192	8,54	<u>4,456</u>		-
12	49,2	0,00190	12,24	6,438		2,1
90 dias						
CP	fbase (mm)	seção (m²)	carga (kN)	resistência (MPa)	média (MPa)	desvio %
13	49,3	0,00191	11,72	<u>6,140</u>	9,378	-
14	49,3	0,00191	18,26	9,566		2,9
15	48,9	0,00188	17,26	9,191		2,9
16	49,4	0,00192	15,92	<u>8,306</u>		-



Resistência àcompressão - Argamassa CH 50%						
7 dias						
CP	fbase (mm)	seção (m <sup>2</sup> )	carga (kN)	resistência (MPa)	média (MPa)	desvio %
26	49,4	0,00192	3,34	1,743	1,747	0,3
27	49,1	0,00189	3,34	1,764		1,0
28	49,4	0,00192	3,42	1,784		2,1
29	49,9	0,00196	3,32	1,698		2,8
14 dias						
CP	fbase (mm)	seção (m <sup>2</sup> )	carga (kN)	resistência (MPa)	média (MPa)	desvio %
30	50,0	0,00196	4,65	<u>2,368</u>	2,980	-
31	49,5	0,00192	5,75	2,988		0,3
32	49,8	0,00195	5,70	2,926		1,8
33	49,2	0,00190	5,75	3,025		1,5
28 dias						
CP	fbase (mm)	seção (m <sup>2</sup> )	carga (kN)	resistência (MPa)	média (MPa)	desvio %
34	49,4	0,00192	10,06	5,249	5,190	1,1
35	49,6	0,00193	8,86	<u>4,586</u>		-
36	49,4	0,00192	10,04	5,238		0,9
37	49,6	0,00193	9,82	5,082		2,1
90 dias						
CP	fbase (mm)	seção (m <sup>2</sup> )	carga (kN)	resistência (MPa)	média (MPa)	desvio %
38	49,5	0,00192	17,52	9,104	9,214	2,1
39	49,5	0,00192	17,70	9,198		0,3
40	49,7	0,00194	18,12	9,340		2,4
41	49,4	0,00192	18,60	<u>9,705</u>		-

Resistência à compressão - Argamassa CH 100%						
7 dias						
CP	fbase (mm)	seção (m <sup>2</sup> )	carga (kN)	resistência (MPa)	média (MPa)	desvio %
51	49,2	0,00190	3,40	1,788	1,758	1,7
52	49,6	0,00193	3,40	1,760		0,1
53	49,8	0,00195	3,36	1,725		1,9
54	49,5	0,00192	3,06	<u>1,590</u>		-
14 dias						
CP	fbase (mm)	seção (m <sup>2</sup> )	carga (kN)	resistência (MPa)	média (MPa)	desvio %
55	49,3	0,00191	6,30	<u>3,300</u>	3,030	-
56	49,9	0,00196	5,84	2,986		1,5
57	49,5	0,00192	6,12	3,180		4,9
58	49,2	0,00190	5,56	2,925		3,5
28 dias						
CP	fbase (mm)	seção (m <sup>2</sup> )	carga (kN)	resistência (MPa)	média (MPa)	desvio %
59	49,1	0,00189	10,14	5,355	5,366	0,2
60	49,5	0,00192	8,10	<u>4,209</u>		-
61	49,2	0,00190	10,12	5,323		0,8
62	49,0	0,00189	10,22	5,420		1,0
90 dias						
CP	fbase (mm)	seção (m <sup>2</sup> )	carga (kN)	resistência (MPa)	média (MPa)	desvio %
63	49,0	0,00189	19,04	10,097	10,061	0,7
64	49,1	0,00189	19,50	10,299		4,4
65	49,4	0,00192	19,04	9,934		2,4
66	49,5	0,00192	19,08	9,915		2,7

Resistência à compressão - Argamassa JL 50%						
7 dias						
CP	fbase (mm)	seção (m <sup>2</sup> )	carga (kN)	resistência (MPa)	média (MPa)	desvio %
76	49,6	0,00193	5,30	<u>2,743</u>	2,317	-
77	49,8	0,00195	4,30	2,208		4,7
78	50,7	0,00202	4,90	2,427		4,7
14 dias						
CP	fbase (mm)	seção (m <sup>2</sup> )	carga (kN)	resistência (MPa)	média (MPa)	desvio %
79	49,5	0,00192	7,62	3,960	3,939	0,5
80	49,6	0,00193	7,76	4,016		2,0
81	50,0	0,00196	7,54	3,840		2,5
28 dias						
CP	fbase (mm)	seção (m <sup>2</sup> )	carga (kN)	resistência (MPa)	média (MPa)	desvio %
82	49,6	0,00193	11,58	5,993	6,091	1,6
84	50,2	0,00198	11,82	5,972		2,0
85	49,3	0,00191	12,66	<u>6,632</u>		-
86	49,5	0,00192	12,14	6,309		3,6
90 dias						
CP	fbase (mm)	seção (m <sup>2</sup> )	carga (kN)	resistência (MPa)	média (MPa)	desvio %
87	49,6	0,00193	23,18	11,997	12,414	3,4
88	49,5	0,00192	24,22	12,586		1,4
89	49,3	0,00191	23,26	12,185		1,8
90	49,4	0,00192	24,70	12,887		3,8

Resistência à compressão - Argamassa JL 100%						
7 dias						
CP	fbase (mm)	seção (m²)	carga (kN)	resistência (MPa)	média (MPa)	desvio %
101	49,8	0,00195	5,58	2,865	2,869	0,1
102	49,1	0,00189	5,44	2,873		0,1
103	49,4	0,00192	4,86	<u>2,536</u>		-
14 dias						
CP	fbase (mm)	seção (m²)	carga (kN)	resistência (MPa)	média (MPa)	desvio %
104	49,4	0,00192	7,40	3,861	4,092	5,6
105	49,6	0,00193	7,96	4,120		0,7
106	49,0	0,00189	8,10	4,296		5,0
28 dias						
CP	fbase (mm)	seção (m²)	carga (kN)	resistência (MPa)	média (MPa)	desvio %
107	50,2	0,00198	12,36	6,245	6,335	1,4
108	50,0	0,00196	12,54	6,387		0,8
109	49,4	0,00192	12,56	6,553		3,4
110	49,9	0,00196	12,04	6,157		2,8
90 dias						
CP	fbase (mm)	seção (m²)	carga (kN)	resistência (MPa)	média (MPa)	desvio %
111	50,0	0,00196	26,22	13,354	13,595	1,8
112	49,2	0,00190	28,28	<u>14,876</u>		-
113	50,3	0,00199	27,04	13,608		0,1
114	49,5	0,00192	26,60	13,823		1,7

## Anexo 1B

Este anexo apresenta os valores obtidos em laboratório para os ensaios de absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica no estado endurecido.

Variações de massa das amostras secas em estufa					
argamassa	amostra n°	massa ao ar (g)	massa seca em estufa (g)		
			24h	48h	72h
REF 0%	20	385,1	349,5	349,7	349,5
	21	386,5	350,3	350,5	350,2
	22	387,3	350,9	351,1	350,9
CH 50%	45	342,3	272,7	272,9	272,4
	46	338,1	269,1	269,2	268,8
	47	333,3	265,3	265,5	265,0
CH 100%	70	320,4	245,6	245,6	245,2
	71	316,0	243,2	243,2	242,7
	72	317,1	242,3	242,4	241,9
JL 50%	93	353,1	325,6	321,6	317,6
	96	355,1	327,3	323,3	319,2
	97	353,6	327,2	323,2	319,1
JL 100%	116	345,5	315,5	311,4	307,3
	118	335,5	305,1	301,3	297,5
	119	336,2	305,7	301,8	297,9

Variações de massa das amostras imersas								
argamassa	amostra n°	massa após dessecador (g)	imersão parcial (g)		massa imersão total (g)			balança hidrostática(g)
			4h	8h	24h	48h	72h	
REF 0%	20	350,06	380,21	396,91	397,69	397,87	398,57	207,29
	21	350,84	381,10	396,05	398,23	398,54	399,00	207,16
	22	351,48	382,26	398,93	399,97	400,16	400,56	206,97
CH 50%	45	273,13	315,84	341,35	352,76	353,50	354,22	160,09
	46	269,44	310,53	336,72	348,78	349,66	350,33	157,18
	47	265,69	307,46	336,47	344,31	345,10	345,75	156,13
CH 100%	70	245,93	292,38	320,29	331,72	332,88	333,78	140,24
	71	243,40	286,92	312,53	327,97	329,02	329,97	138,65
	72	242,66	286,64	320,41	327,42	328,32	329,23	137,39
JL 50%	93	318,23	342,98	356,94	364,90	365,26	365,55	173,85
	96	319,95	345,55	359,98	367,29	367,78	368,04	175,12
	97	319,87	341,88	355,53	364,73	365,16	365,44	173,78
JL 100%	116	307,98	334,35	348,62	356,67	357,37	357,82	161,64
	118	298,13	324,59	337,55	345,38	345,97	346,50	156,65
	119	298,46	324,74	338,68	346,27	346,81	347,07	156,15

## Anexo 1C

Este anexo apresenta os valores obtidos em laboratório para o ensaio de absorção por capilaridade.

Argamassa	CP	Leituras de massa (g)					
		inicial	3h	6h	24h	48h	72h
REF 0%	23	356,56	369,12	373,12	386,93	397,58	401,32
	24	354,18	367,05	371,04	384,72	395,59	398,84
	25	357,88	371,11	375,71	391,51	401,71	402,66
CH 50%	48	295,69	308,72	312,31	323,18	331,86	337,83
	49	285,49	299,39	303,11	314,35	322,43	328,34
	50	281,90	294,25	297,89	308,78	317,07	323,27
CH 100%	73	262,44	275,39	279,74	290,22	298,44	304,02
	74	269,26	281,72	286,31	299,02	308,28	315,40
	75	268,14	281,21	285,56	298,00	308,40	314,91
JL 50%	98	315,74	327,07	330,12	338,87	345,14	349,45
	99	309,29	320,54	323,46	332,05	338,00	342,38
	100	312,91	324,50	327,74	337,12	343,57	348,47
JL 100%	120	300,00	314,08	318,40	330,69	339,52	345,57
	121	291,61	304,03	307,99	319,55	328,08	334,65
	122	289,60	302,37	306,07	317,45	325,32	330,60

Traço	CP	seção (cm <sup>2</sup> )	Absorção (g/cm <sup>2</sup> )					Absorção média (g/cm <sup>2</sup> )				
			3h	6h	24h	48h	72h	3h	6h	24h	48h	72h
REF 0%	23	19,24	0,65	0,86	1,58	2,13	2,33	0,67	0,89	1,64	2,18	2,32
	24	19,17	0,67	0,88	1,59	2,16	2,33					
	25	19,40	0,68	0,92	1,73	2,26	2,31					
CH 50%	48	19,40	0,67	0,86	1,42	1,86	2,17	0,68	0,86	1,43	1,86	2,17
	49	19,40	0,72	0,91	1,49	1,90	2,21					
	50	19,40	0,64	0,82	1,39	1,81	2,13					
CH 100%	73	18,93	0,68	0,91	1,47	1,90	2,20	0,67	0,91	1,53	2,02	2,36
	74	18,93	0,66	0,90	1,57	2,06	2,44					
	75	19,17	0,68	0,91	1,56	2,10	2,44					
JL 50%	98	19,40	0,58	0,74	1,19	1,52	1,74	0,59	0,75	1,21	1,53	1,76
	99	19,63	0,57	0,72	1,16	1,46	1,69					
	100	19,01	0,61	0,78	1,27	1,61	1,87					
JL 100%	120	19,40	0,73	0,95	1,58	2,04	2,35	0,68	0,88	1,49	1,92	2,23
	121	19,56	0,63	0,84	1,43	1,86	2,20					
	122	19,17	0,67	0,86	1,45	1,86	2,14					

## Anexo 1D

Este anexo apresenta os valores obtidos em laboratório para o ensaio de **resistência de aderência à tração**.

número de amostras	REF 0%		CH 50%		CH 100%		JL 50%		JL 100%	
	carga (KN)	forma de ruptura	carga (KN)	forma de ruptura	carga (KN)	forma de ruptura	carga (KN)	forma de ruptura	carga (KN)	forma de ruptura
1	0,463	A	0,286	A	0,368	B	0,407	B	0,268	A
2	0,472	A	0,284	A	0,281	A	0,266	A	0,265	A
3	0,654	A	0,142	A	0,178	A	0,644	A	0,239	A
4	0,640	B	0,143	A	0,369	B	0,226	A	0,527	A
5	0,730	B	0,192	A	0,386	A	0,478	B	0,286	A
6	0,348	A	0,161	A	0,236	A	0,409	A	-	-
7	0,761	A	-	-	0,115	A	-	-	-	-

Sendo as formas de ruptura identificadas pela NBR 13528 como:

- A. Ruptura na interface argamassa / substrato
- B. Ruptura na argamassa de revestimento
- C. Ruptura no substrato
- D. Ruptura na interface revestimento / cola
- E. Ruptura na interface cola / pastilha.